

Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2025

Montagnes et Glaciers, des châteaux d'eau



Publié en 2025 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
7, Place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

© UNESCO 2025

ISBN 978-92-3-200337-9

<https://doi.org/10.54679/BHUV5700>



Le présent rapport est publié par l'UNESCO pour le compte d'ONU-Eau. La liste des membres et des partenaires d'ONU-Eau est disponible à l'adresse suivante www.unwater.org.

Œuvre publiée en libre accès sous la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC-BY-SA 3.0 IGO) (creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/). Les utilisateurs du contenu de la présente publication acceptent les termes d'utilisation de l'Archive ouverte de libre accès de l'UNESCO (www.unesco.org/fr/open-access/cc-sa).

La présente licence s'applique exclusivement au contenu des textes de cette publication. L'utilisation de contenus n'étant pas clairement identifiés comme appartenant à l'UNESCO devra faire l'objet d'une demande d'autorisation préalable auprès du titulaire du droit d'auteur.

Section 7.2 : Jos Timmerman et Hanna Plotnykova © 2024 ONU.

Les images marquées d'un astérisque (*) ne sont pas couvertes par la licence CC-BY-SA et ne peuvent en aucune façon être reproduites sans l'autorisation expresse des détenteurs des droits de reproduction.

Titre original : *The United Nations World Water Development Report 2025 – Mountains and glaciers: Water towers*.

Publié en 2025 par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture.

Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'UNESCO, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. De même, les frontières et les noms indiqués et les désignations employées sur les cartes n'impliquent pas reconnaissance ou acceptation officielle par l'Organisation des Nations Unies. La souveraineté sur les îles Falkland (Malvinas) fait l'objet d'un différend entre le Gouvernement de l'Argentine et le Gouvernement du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord.

Les idées et opinions exprimées dans cette publication sont celles des auteurs ; elles ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'UNESCO et n'engagent en aucune façon l'Organisation. Les membres et partenaires d'ONU-Eau, ainsi que d'autres listés sur les pages de titre des chapitres du rapport, en ont rédigé les contenus. L'UNESCO et le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP de l'UNESCO) ne sont pas responsables des erreurs présentes dans les contenus fournis ou des contradictions dans les données et contenus entre les différents chapitres de ce rapport. Le WWAP de l'UNESCO a offert la possibilité aux individus d'être listés comme auteurs et contributeurs ainsi que d'être cités dans cette publication. Le WWAP de l'UNESCO n'est responsable d'aucune omission à cet égard.

Citation suggérée :

Organisation des Nations Unies, *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2025 – Montagnes et Glaciers : des châteaux d'eau*. UNESCO, Paris.

Couverture originale de Davide Bonazzi.

Traduit par International Translation Agency Ltd (ITA).

Conception graphique et mise en page par Marco Tonsini.

Imprimé par UNESCO CLD.

Imprimé à Paris.

Cette publication est imprimée sur du papier 100 % recyclé, sans chlore.



Climatiquement neutre
Production
ClimatePartner.com/12066-2002-1001



B R E F R É S U M É

Des milliards de personnes dépendent de l'eau douce qui s'écoule d'environnements de montagne de plus en plus fragiles

Les ressources en eau que nous apportent les montagnes sont littéralement en train de fondre sous nos yeux.

Les montagnes et les glaciers alpins, dont on dit souvent qu'ils sont les « châteaux d'eau » de la planète, sont de plus en plus vulnérables au changement climatique et aux activités anthropiques non durables, ce qui met en péril les ressources en eau dont dépendent des milliards de personnes et d'innombrables écosystèmes.

*Jusqu'à 60 %
des ressources en eau
douce de la planète
proviennent des
montagnes*

Le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2025 — Montagnes et Glaciers : des châteaux d'eau* attire l'attention sur les services essentiels et les bénéfices que procurent les eaux de montagne et les glaciers alpins aux sociétés, aux économies et à l'environnement. S'intéressant particulièrement aux solutions techniques et aux orientations politiques requises pour améliorer la gestion de l'eau dans les montagnes, le rapport aborde des problématiques fondamentales telles que l'approvisionnement en eau et l'assainissement, l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à celui-ci, la sécurité alimentaire et énergétique, l'industrie, la réduction des risques de catastrophe naturelle ainsi que la protection des écosystèmes.

Faire face à la crise mondiale de l'eau implique de commencer par le haut.



“Les guerres prenant naissance dans l'esprit des hommes et des femmes, c'est dans l'esprit des hommes et des femmes que doivent être élevées les défenses de la paix”



Montagnes et Glaciers, des châteaux d'eau

Table des matières

Avant-propos par Audrey Azoulay, <i>Directrice générale de l'UNESCO</i>	x
Avant-propos par Alvaro Lario, <i>Président d'ONU-Eau et Président du FIDA</i>	xii
Préface	xiii
Équipe de réalisation du WWDR 2025	xv
Remerciements	xvi
Résumé	1
Prologue	10
Ressources en eau : évolution de la demande et de la disponibilité.....	11
Les progrès accomplis dans la réalisation de l'ODD 6	13
Références.....	16
Chapitre 1 : Introduction	18
1.1 Les régions de montagne dans le monde	20
1.2 Utilisation des eaux de montagne et dépendance à leur égard.....	22
1.3 Populations et communautés des régions montagneuses.....	24
1.4 La cryosphère de montagne dont les glaciers.....	24
Références.....	26
Chapitre 2 : Modifications de la cryosphère et conséquences sur les ressources en eau	27
2.1 Dynamique de la cryosphère de montagne	29
2.2 Répercussions de l'évolution des conditions d'enneigement et de glace en montagne	33
2.3 Les défis en matière de gestion de l'eau	40
2.4 Conclusions	41
Références.....	42
Chapitre 3 : Alimentation et agriculture	46
3.1 Sécurité alimentaire et agriculture.....	47
3.2 Défis pour l'agriculture de montagne et la sécurité alimentaire	52
3.3 Réagir.....	56
3.4 Conclusions	60
Références.....	61
Chapitre 4 : Établissements humains et réduction des risques de catastrophes	64
4.1 Défis	65
4.2 Actions	68
4.3 Conclusions	71
Références.....	72

Table des matières

Chapitre 5 : Industrie et énergie	74
5.1 Défis	76
5.2 Impacts de la pollution industrielle sur la qualité de l'eau	76
5.3 Exemples d'usages de l'eau par les secteurs de l'industrie et de l'énergie.....	78
5.4 L'hydroélectricité dans les régions montagneuses	80
5.5 Permettre un développement industriel inclusif et durable	82
Références.....	84
Chapitre 6 : Environnement	87
6.1 Les services écosystémiques de la cryosphère de montagne	89
6.2 Évolutions de la cryosphère et des services écosystémiques de montagne.....	89
6.3 Actions	93
Références.....	98
Chapitre 7 : Perspectives régionales	100
7.1 Afrique subsaharienne	101
7.2 Europe et Asie centrale	106
7.3 Amérique latine et Caraïbes	113
7.4 Asie et Pacifique	119
7.5 Région arabe	126
Références.....	132
Chapitre 8 : Renforcement des savoirs et des capacités.....	139
8.1 Lacunes des données et des connaissances sur la haute montagne	140
8.2 Contributions des savoirs autochtones, sexospécifiques et locaux	147
8.3 Renforcement des capacités	149
8.4 Le partage des informations et la communication	151
8.5 Conclusions	153
Références.....	154
Chapitre 9 : Gouvernance et financement.....	156
9.1 Gouvernance des eaux de montagne au niveau international.....	157
9.2 Gouvernance régionale des eaux de montagne	159
9.3 Gouvernances nationale et locale des eaux de montagne.....	162
9.4 Valorisation et financement	164
Références.....	167
Chapitre 10 : Conclusions.....	169
Les montagnes, notre affaire à tous	170
Actions : aller de l'avant.....	171
Coda	173
Acronymes	175

Encadrés, figures et tableaux

Encadrés

Encadré 1.1 Délimiter les régions montagneuses	22
Encadré 2.1 Effets du carbone noir, de la poussière et d'autres particules sur la fonte des neiges et des glaces	31
Encadré 2.2 Mise en garde contre l'application du concept de « pic d'eau » lors de la gestion des ressources en eau.....	35
Encadré 2.3 Rétroactions entre privations de neige, incendies de forêt et coulées de débris	38
Encadré 2.4 Gestion des vidanges brutales de lacs glaciaires au Pérou.....	39
Encadré 3.1 Sécurité alimentaire et objectifs de développement durable (ODD)	48
Encadré 3.2 Le système de rizières en terrasse des Hani de Honghe.....	51
Encadré 3.3 Dépendance du bassin indo-gangétique envers les eaux de fonte de la cryosphère	55
Encadré 3.4 Mesures innovantes d'adaptation à la fonte des glaciers compromettant la disponibilité de l'eau pour l'agriculture irriguée	57
Encadré 3.5 Le réseau international de systèmes participatifs de garantie (SPG) en montagne	59
Encadré 4.1 Conséquences des inondations de 2021 au Népal	66
Encadré 4.2 Un système d'approvisionnement en eau et d'assainissement par gravité au niveau communautaire.....	71
Encadré 5.1 Protéger les glaciers des impacts de l'exploitation minière : la mine de Pascua-Lama au Chili.....	79
Encadré 6.1 Les páramos, des écosystèmes de montagne uniques en Amérique du Sud.....	88
Encadré 6.2 Des approches axées sur la neutralité en matière de dégradation des terres (NDT) dans les montagnes	95
Encadré 6.3 Acción Andina : la restauration des espaces forestiers dans les hautes Andes	95
Encadré 6.4 Renforcer la résilience des montagnes : la restauration d'un bassin versant dans les montagnes du Pamir, en Afghanistan	96
Encadré 7.1 L'importance des châteaux d'eau de Madagascar pour l'agriculture	103
Encadré 7.2 Protéger les glaciers par des bâches isolantes	108
Encadré 7.3 Un dispositif collectif et transfrontière d'alerte précoce aux inondations	125
Encadré 8.1 International Network for Alpine Research Catchment Hydrology (INARCH).....	143
Encadré 8.2 Co-développement d'une stratégie de recherche sur l'eau au service des peuples autochtones et des communautés locales	148
Encadré 8.3 Le Centre de recherches sur les écosystèmes d'altitude, un legs des sciences participatives dans les Alpes	151
Encadré 8.4 Au-delà des capacités techniques : l'importance de la confiance en la réussite d'un projet	153
Encadré 9.1 Composition des initiatives régionales de gouvernance dans les régions montagneuses	159
Encadré 9.2 L'Équipe spéciale de haut niveau pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch	161
Encadré 9.3 Les pertes financières dues aux aléas naturels en montagne	164
Encadré 9.4 Facteurs pouvant encourager les investissements financiers dans les régions montagneuses	165

Figures

Figure P.1 Prélèvements mondiaux d'eau par principaux secteurs d'emploi, 2000-2021 (en km ³ /an).....	11
Figure P.2 Prélèvements d'eau par secteur (en % du total des prélèvements d'eau douce) par niveau de revenu, 2020	12
Figure P.3 État de réalisation des cibles de l'ODD 6 en 2024	13
Figure P.4 Proportion de la population utilisant des services d'alimentation en eau potable gérés de façon sûre, 2022	14
Figure P.5 Proportion de la population utilisant des services d'assainissement gérés de façon sûre (indicateur 6.2.1a des ODD) dans différentes régions, 2022.....	14
Figure 1.1 Délimitation des régions montagneuses et densité de population, 2015.....	21

Figure 1.2 Estimations de l'importance future des régions de montagne et de la dépendance des populations, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)	23
Figure 1.3 Variation de masse des glaciers dans le monde, 1950-2020	25
Figure 2.1 Processus hydrologiques et cryosphériques de haute montagne gouvernant les flux d'eau	29
Figure 2.2 Principaux changements cryosphériques et hydrologiques causés par le réchauffement climatique dans les régions de haute montagne au XXI ^e siècle	32
Figure 2.3 Modification, en pourcentage, de la fréquence des pluies sur neige en haute montagne dans le monde pour 1 ^o C de réchauffement, 1982-2014	33
Figure 2.4 Changements d'altitude de la surface des glaciers dans le monde, 2000-2019	34
Figure 2.5 Contributions de la fonte des glaciers et des précipitations au débit des cours d'eau dans des exemples de grands bassins disposant de sources en montagne	36
Figure 2.6 Répercussions des changements climatiques, hydrologiques et cryosphériques sur les peuples autochtones et les communautés locales des régions froides	40
Figure 3.1 Schéma en coupe de terrasses construites dans la pente	50
Figure 5.1 Voies de transport et processus de dépôt des contaminants au sein des environnements glaciaires	77
Figure 6.1 (a) Services écosystémiques fournis par la cryosphère de montagne et les écosystèmes de haute altitude ; (b) Liens entre ces services et les objectifs de développement durable (ODD)	90
Figure 7.1 Les châteaux d'eau en Afrique	102
Figure 7.2 Carte topographique des Alpes	107
Figure 7.3 Les chaînes de montagnes du Tian Shan et du Pamir en Asie centrale	112
Figure 7.4 Les principales chaînes de montagnes et rivières d'Amérique latine et des Caraïbes	114
Figure 7.5 Répartition de la masse des glaciers à l'échelle régionale, exprimée en mètres d'équivalent en eau (m.e.a.) par an, entre différentes zones de la région himalayenne de l'Hindou Kouch au cours des périodes 1975-1999, 2000-2009 et 2010-2019	120
Figure 7.6 Nombre de vidanges brutales de lacs glaciaires enregistrées par décennie dans les régions de haute montagne d'Asie, décennies de 1830 à 2020	121
Figure 7.7 Diminution passée et future de la quantité d'eau renouvelable par habitant en fonction de la croissance démographique estimée dans la région arabe, 2002-2050	126
Figure 7.8 Sommets et chaînes de montagnes dans la région arabe	127
Figure 7.9 Répartition chronologique de la durée de l'enneigement annuel sur le mont Liban (plus de 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer), 1970-2100	129
Figure 7.10 Répartition chronologique de la durée de l'enneigement annuel dans les montagnes de l'Atlas (plus de 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer), 1970-2100	129
Figure 7.11 Évolution de l'épaisseur moyenne saisonnière de la neige (octobre à mars) sur le mont Liban pour les périodes 1981-2000, 2021-2040 et 2041-2060	130
Figure 7.12 Évolution de l'épaisseur moyenne saisonnière de la neige (octobre à mars) dans les montagnes de l'Atlas pour les périodes 1981-2000, 2021-2040 et 2041-2060	130
Figure 8.1 Répartition mondiale des stations hydrométéorologiques par altitude, 1750-2024	141
Figure 8.2 Composantes d'un système d'information hydrologique	145
Figure 8.3 Cadre conceptuel intégrant les effets du rétrécissement de la cryosphère sur les services écosystémiques relatifs à l'approvisionnement, la régulation et les pratiques culturelles	146

Tableaux

Tableau P.1 Prélèvements d'eau douce dans le monde par secteur, 2000 et 2021	11
Tableau 5.1 Empreinte hydrique annuelle du minage de bitcoins dans le monde, 2020-2021	78

Avant-propos

par **Audrey Azoulay**, Directrice générale de l'UNESCO

Quel que soit l'endroit où nous vivons, nous dépendons tous, d'une manière ou d'une autre, des montagnes et des glaciers, châteaux d'eau de notre planète.

Les montagnes, qui occupent une superficie de 33 millions de kilomètres carrés, sont d'une importance capitale pour le maintien de la vie sur Terre. Plus de 1,1 milliard de personnes, soit 15 % de la population mondiale, vivent dans des régions montagneuses et deux milliards de personnes supplémentaires en aval dépendent de ces réserves d'eau naturelles, alimentées par la fonte des glaciers.

Or, ces glaciers – tout comme plus de trois milliards de personnes et d'innombrables écosystèmes tels que les forêts, les zones humides, les sols et les cours d'eau qui en ont besoin – courent un risque grave. Le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2025* fournit une vue d'ensemble de l'état actuel des glaciers et de la cryosphère tout en mettant en évidence les risques économiques, environnementaux et sociétaux immenses auxquels nous sommes actuellement exposés.

Le rapport révèle notamment que les Andes, dont provient la moitié du volume d'eau du fleuve Amazone, ont perdu entre 30 % et 50 % de leurs glaciers depuis les années 1980. Si rien n'est fait, les glaciers du mont Kenya, des monts Rwenzori et du mont Kilimandjaro devraient avoir entièrement disparu, selon les prédictions, d'ici à 2040. Pour sa part, le bien nommé « troisième pôle », également appelé aire Hindou Kouch-Karakoram-Himalaya, pourrait perdre, d'ici à 2100, la moitié du volume actuel de ses glaciers qui s'étendent sur 100 000 kilomètres carrés.

Portant un regard critique sur la situation, notre rapport souligne que de nombreux problèmes liés à l'adaptation au changement climatique et à la gestion des ressources en eau revêtent un caractère transnational, c'est dire que les solutions les plus efficaces passent par une approche multilatérale.

En tant qu'agence de l'ONU spécialiste des sciences et de la coopération hydrologiques, l'UNESCO joue un rôle essentiel dans la recherche de telles solutions à travers l'établissement et le partage des connaissances, l'éducation relative à l'eau et le dialogue international dont elle se fait l'hôte.

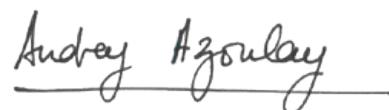
Sans une gestion appropriée, les systèmes hydriques alimentés par les montagnes et les glaciers risquent de devenir des objets de conflits fréquents, d'autant que ces précieuses ressources sont confrontées à des problèmes croissants. Nous sommes toutefois convaincus qu'une gouvernance renforcée des eaux transfrontalières, étayée par la coopération internationale, peut être un vecteur décisif de paix entre pays voisins. C'est dans cet esprit que la Coalition pour la coopération dans le domaine des eaux transfrontalières a été lancée au siège de l'UNESCO, en 2022, afin d'offrir une plateforme de coopération aux pays qui dépendent de ressources en eau partagées comme les aquifères, les lacs ou les bassins fluviaux.

Notre Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau, qui a coordonné la réalisation de ce rapport, est en première ligne des efforts de synthèse et de diffusion des savoirs sur la gestion durable des ressources en eau à l'échelle mondiale. Le travail qu'il effectue nous aide à mieux comprendre les enjeux et à déterminer les mesures qu'il nous faut prendre.

La communauté internationale doit impérativement regrouper ses forces et se mobiliser afin de protéger les glaciers et la cryosphère. Afin de renforcer la sensibilisation et encourager les actions, l'Assemblée générale des Nations Unies a proclamé l'année 2025, Année internationale de la préservation des glaciers. Celle-ci sera aussi la première année de la Décennie d'action pour les sciences cryosphériques, pour laquelle l'UNESCO a été choisie comme organisme de coordination.

La rédaction du présent rapport, publié au nom de toute la famille ONU-Eau, n'aurait pas été possible sans le concours de tous nos partenaires. L'UNESCO remercie en particulier le Gouvernement italien, qui soutient la publication de ce rapport depuis près de vingt ans.

Pour la protection des systèmes hydriques de notre planète, le moment est crucial. J'espère que ce rapport servira de déclencheur – tant au niveau local qu'aux niveaux national et international – à une action rapide et collective.



Audrey Azoulay

Avant-propos

par **Alvaro Lario**, *Président d'ONU-Eau et
Président du Fonds international de développement agricole*

Pour des milliards de personnes, l'eau de fonte des montagnes est indispensable pour s'approvisionner en eau potable et disposer d'un assainissement. Elle leur est nécessaire pour garantir leur sécurité alimentaire et énergétique comme pour préserver l'intégrité de leur environnement.

Aujourd'hui, pourtant, sous l'effet du réchauffement climatique, les glaciers fondent à une vitesse sans précédent de sorte que le cycle de l'eau devient de plus en plus imprévisible et ponctué de phénomènes naturels extrêmes.

Le recul des glaciers accentue les inondations, les sécheresses, les glissements de terrain et l'élévation du niveau de la mer, entraînant des conséquences dévastatrices pour les êtres humains comme pour la nature.

L'édition 2025 du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau – Montagnes et Glaciers : des châteaux d'eau* propose des solutions pour nous aider à atténuer les changements rapides qui affectent les ressources en eau provenant de la cryosphère tout comme à nous y adapter.

Ce rapport dresse un état des lieux précis de la situation actuelle ainsi que des recommandations sur ce qu'il nous faut changer.

En présentant, de façon détaillée, les relations qui existent entre l'eau douce des montagnes, les services essentiels et le monde naturel, ce rapport met en évidence combien la conservation de la cryosphère est d'une importance primordiale à la réalisation des objectifs de développement durable. Il rappelle, avec force, l'urgence d'une réduction drastique des émissions de carbone.

Sauver nos glaciers constitue une stratégie de survie – une stratégie que nous devons poursuivre ensemble. Afin d'aider le système des Nations Unies à coordonner son action, l'année 2025 a été déclarée Année internationale de la préservation des glaciers ; elle ouvre aussi la Décennie d'action pour les sciences cryosphériques (2025-2034).

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à tous les membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi qu'à toutes les personnes qui ont apporté leur concours à ce rapport aussi précieux que pertinent. Je tiens également à saluer le travail de coordination exceptionnel qu'ont fourni l'UNESCO et son Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau aux fins de la production de ce document.



Alvaro Lario

Préface

par **Michela Miletto**, Coordinatrice du WWAP de l'UNESCO
et **Richard Connor**, Rédacteur en chef

« *Dis-moi ce que je peux faire, je t'en prie. Il y a bien quelque chose que je dois pouvoir faire.* »

Ernest Hemingway, *Les Neiges du Kilimandjaro*

Tout comme les photographies d'ours polaires assis sur des icebergs de plus en plus minuscules, les clichés spectaculaires qui montrent le recul rapide des glaciers alpins sont devenus emblématiques des impacts que les êtres humains ont sur la Terre et son environnement naturel.

L'Assemblée générale des Nations Unies a choisi l'année 2025 comme Année internationale de la préservation des glaciers afin de sensibiliser le public sur le rôle essentiel que jouent les glaciers, mais aussi la neige et la glace, au sein du système climatique terrestre et du cycle de l'eau, ainsi que sur les graves conséquences de la fonte glaciaire accélérée. La cryosphère alpine n'est pas toutefois la seule composante des systèmes montagneux soumis au changement climatique et aux activités anthropiques non durables, qui touchent l'ensemble de ces « châteaux d'eau » que sont les montagnes. En effet, partout dans le monde, qu'elles se trouvent même dans les tropiques ou les petits États insulaires, ces montagnes subissent des changements sans précédent. Or, d'une façon ou d'une autre, nous vivons tous en aval d'une montagne.

Douzième d'une série de rapports thématiques annuels, l'édition 2025 du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (WWDR) se propose d'explorer l'importance des eaux de montagne pour le développement durable ainsi que les politiques et les mesures de gestion qui doivent être adoptées, non seulement pour assurer la pérennité de cette ressource, mais aussi pour optimiser les nombreuses opportunités que celle-ci offre dans un monde en rapide évolution, où la demande en eau ne cesse de croître tandis que les pénuries se font de plus en plus nombreuses.

Comme à l'accoutumée, le rapport apporte des analyses détaillées du sujet, traité sous différentes perspectives sociales, économiques et environnementales, allant de la sécurité alimentaire et énergétique à l'approvisionnement en eau, l'assainissement et la réduction des risques de catastrophe naturelle. Il montre ainsi comment les mesures prises dans les régions montagneuses ont une incidence sur les populations et les écosystèmes en aval, et souligne la nécessité de protéger et de gérer durablement nos châteaux d'eau, qui forment des systèmes fragiles et vulnérables. Il ne s'agit pas seulement d'un défi local ou régional mais d'un défi mondial.

Cette nouvelle édition du WWDR présente les travaux scientifiques les plus récents sur le rôle des montagnes et des glaciers dans la résolution de la crise mondiale de l'eau. Cette année encore, nous avons eu pour ambition de produire un état des lieux équilibré, factuel et objectif de l'état des savoirs et des connaissances, qui inclut les découvertes les plus récentes.

Bien qu'il soit d'abord destiné aux responsables et décideurs politiques ainsi qu'aux gestionnaires des ressources en eau, aux universitaires et à l'ensemble des acteurs du développement qui les conseillent, nous espérons que ce rapport intéressera également les non-spécialistes, y compris celles et ceux qui contribuent à la lutte contre la pauvreté et les crises humanitaires, aux fins du respect des droits humains à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement, ainsi qu'à l'application du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

Cette nouvelle édition du WWDR résulte d'efforts concertés de la part de tous les organismes chargés des chapitres, dont les noms figurent dans les remerciements. Le rapport a grandement bénéficié des apports et des contributions de plusieurs autres membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi que de nombreux instituts de recherche, universités, associations scientifiques et organisations non gouvernementales, qui ont tous fourni une diversité d'éléments pertinents.

Au nom du secrétariat du Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP de l'UNESCO), nous souhaitons exprimer notre plus profonde gratitude aux organismes mentionnés ci-dessus, membres et partenaires d'ONU-Eau, comme aux auteurs et aux autres contributeurs qui ont rédigé, collectivement, ce rapport de référence unique. Nous sommes infiniment reconnaissants au Gouvernement italien de son financement du WWAP de l'UNESCO et de la production du WWDR depuis 2008 ainsi qu'à la Regione Umbria de la mise à disposition de Villa La Colombella, à Pérouse, qui accueille le secrétariat du WWAP de l'UNESCO. Leurs participations ont été essentielles à la production du WWDR.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Audrey Azoulay, Directrice générale de l'UNESCO, qui soutient de façon indéfectible le WWAP de l'UNESCO et la réalisation du WWDR, ainsi qu'Alvaro Lario, Président d'ONU-Eau et Président du Fonds international de développement agricole.

Enfin, nous exprimons notre plus sincère gratitude envers nos collègues du secrétariat du WWAP de l'UNESCO, dont les noms figurent dans les remerciements. Ce rapport n'aurait pas pu vu le jour sans leur professionnalisme et leur dévouement.



Michela Miletto



Richard Connor

Équipe de réalisation du WWDR 2025

Directrice (jusqu'en janvier 2025) et directeur de publication

Michela Miletto et Miguel Doria

Rédacteur en chef

Richard Connor

Coordinateur

Engin Koncagül

Assistante de publication

Valentina Abete

Graphiste

Marco Tonsini

Éditrice (version française)

Céline Curiol

Secrétariat du Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (2024–2025)

Coordinateur par intérim : Miguel Doria

Coordinatrice (jusqu'en janvier 2025) : Michela Miletto

Programmes : Chorong Ahn, Richard Connor, Laura Veronica Imburgia, Beobkyung Kim, Engin Koncagül, Teresa Liguori, Bhanu Neupane et Laurens Thuy

Publications : Valentina Abete, Martina Favilli et Marco Tonsini

Communications : Simona Gallese

Administration : Barbara Bracaglia, Lucia Chiodini et Arturo Frascani

Informatique et sécurité : Michele Brensacchi

Remerciements

Le présent rapport est publié par l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau (WWAP de l'UNESCO). Nous remercions les membres et partenaires d'ONU-Eau ainsi que les autres contributeurs, qui ont rendu possible l'élaboration du contenu de ce rapport.

Organismes chargés des chapitres

Commissions régionales des Nations Unies (Commission économique pour l'Europe – CEE, Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes – CEPALC, Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique – CESAP, Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale – CESAO), Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), Organisation météorologique mondiale (OMM), Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat) et UNESCO (Programme hydrologique intergouvernemental – PHI, Bureau de l'UNESCO à Nairobi et WWAP de l'UNESCO).

Contributeurs

Agence de gestion des bassins versants du Bug occidental et du Sian, Centre d'information scientifique de la Commission inter-États pour la coordination de l'utilisation des ressources en eau de l'Asie centrale (SIC ICWC), Centre de recherche économique et sociale et de formation de Maastricht pour l'innovation et la technologie auprès de l'UNU (UNU-MERIT), Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD), CESAP, École polytechnique de Gdańsk, Institut pour l'environnement et la sécurité humaine de l'UNU (UNU-EHS), Institut pour les études comparatives d'intégration régionale de l'UNU (UNU-CRIS), OMM, ONUDI, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), Réseau d'approvisionnement en eau en milieu rural (RWSN), Secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD), UNESCO-PHI, Université de Berne.

Donateurs

L'élaboration du présent rapport a reçu le soutien financier du Gouvernement italien et de la Région Ombrie. Nous tenons à remercier toutes celles et tous ceux qui y ont contribué ainsi que leurs donateurs respectifs.

Résumé

• • •
En tant que châteaux d'eau de la planète, les montagnes sont une source essentielle d'eau douce

Dans le sillage du choix de l'année 2025 comme Année internationale de la préservation des glaciers et de l'adoption d'une résolution sur le développement durable dans les régions montagneuses par l'Assemblée générale de l'Organisation des Nations Unies en 2022, le présent rapport vise à rappeler à l'humanité, l'importance des eaux de montagne, en particulier des glaciers alpins, pour le développement durable des régions montagneuses ainsi que pour les sociétés en aval qui en dépendent, et ce alors que la cryosphère de montagne subit un bouleversement rapide.

État des ressources en eau mondiales

Selon les estimations les plus récentes (datées de 2021), l'agriculture exploite 72 % des volumes d'eau douce prélevés au niveau mondial tandis que 15 % et 13 % sont prélevés pour les usages industriels et domestiques (ou municipaux) respectivement. Les taux propres à chaque secteur varient considérablement selon le niveau de développement économique des pays. Les pays à revenu élevé utilisent davantage d'eau pour l'industrie quand les pays à faible revenu utilisent 90 % (ou plus) de leurs ressources en eau à des fins d'irrigation agricole.

Au cours de la période 2000-2021, les prélèvements mondiaux d'eau douce ont augmenté de 14 %, ce qui correspond à un taux moyen d'augmentation de 0,7 % par an. Cette augmentation concerne principalement les villes, les pays et les régions qui connaissent un développement économique rapide. La croissance démographique, en revanche, ne semble pas contribuer de manière significative à l'accroissement de cette demande. De fait, les pays où la consommation en eau par habitant est la plus faible, parmi lesquels plusieurs pays d'Afrique subsaharienne, sont souvent ceux dont la population augmente le plus rapidement.

Vingt-cinq pays, abritant un quart de la population mondiale, sont exposés à un stress hydrique « extrêmement élevé » chaque année. On estime que près de 4 milliards de personnes, soit la moitié de la population mondiale, sont confrontées à de graves pénuries d'eau pendant une partie de l'année.

Le changement climatique accroît la variabilité saisonnière ainsi que l'incertitude concernant la disponibilité des ressources en eau dans la plupart des régions. La pollution, la dégradation des sols et des écosystèmes ainsi que les risques naturels peuvent compromettre davantage la disponibilité de ces ressources.

Progrès réalisés pour atteindre l'ODD 6

Le sixième objectif de développement durable (ODD 6) vise à garantir la disponibilité et la gestion durable des ressources en eau et de l'assainissement pour toutes et tous.

Toutefois, la réalisation des cibles de l'ODD 6 n'est pas en bonne voie ; pour certaines d'entre elles, le retard accumulé est même très important.

En 2022, quelque 2,2 milliards de personnes (27 % de la population mondiale) n'avaient pas accès à des services d'eau potable gérés de façon sûre, quatre personnes sur cinq vivant en zone rurale n'ayant pas même accès à des services de distribution d'eau potable.

En ce qui concerne l'assainissement, la situation est pire puisque 3,5 milliards de personnes dans le monde n'avaient pas accès à des services d'assainissement gérés de façon sûre en 2022. En Amérique latine et dans les Caraïbes comme en Asie centrale et en Asie du Sud, seule la moitié de la population avait accès à ces services. En Afrique subsaharienne, la distribution de ces services ne touchait pas plus de 24 % de la population.

• • •

Sous l'effet du réchauffement climatique, la fonte des glaciers s'accélère, le manteau neigeux diminue, les précipitations et les risques naturels deviennent plus extrêmes

En raison d'un manque de données et de suivi, il est extrêmement difficile de procéder à une analyse complète des avancées pour les autres cibles de l'ODD 6, notamment celles relatives à la gestion des ressources en eau, à la qualité de l'eau, aux écosystèmes tributaires de l'eau et à la création d'un environnement propice.

Régions montagneuses

En tant que véritables châteaux d'eau de la planète, les montagnes sont une source essentielle d'eau douce. Elles sont indispensables pour répondre aux besoins humains fondamentaux, notamment en matière d'approvisionnement en eau et d'assainissement. Elles permettent également d'assurer la sécurité alimentaire et énergétique de milliards de personnes vivant dans les régions montagneuses et aux alentours ainsi que dans les zones situées en aval.

Au sein des régions montagneuses, les principales activités économiques incluent l'agriculture, l'élevage, la sylviculture, le tourisme, l'exploitation minière, le commerce transfrontalier et la production d'énergie. Ces régions produisent des marchandises à forte valeur tels les plantes médicinales, le bois et autres produits forestiers, un bétail particulier et des spécialités agricoles régionales. Elles constituent aussi des zones sensibles en termes de biodiversité agricole, une grande partie du patrimoine génétique mondial servant à l'agriculture comme des plantes médicinales s'y trouvant.

Les montagnes comportent une grande diversité de zones écologiques dont chacune résulte d'une combinaison spécifique de facteurs tels l'altitude, la géomorphologie, l'isolement et les conditions micro-climatiques (rayonnement solaire par exemple). Par conséquent, elles présentent souvent une biodiversité endémique plus riche que les zones de plus faible altitude, et notamment de larges variétés de cultures agricoles et d'espèces animales d'un point de vue génétique. On y trouve également une gamme tout aussi diversifiée de cultures humaines.

Les glaciers et la cryosphère de montagne

La cryosphère de montagne compte parmi les éléments du système terrestre les plus sensibles au changement climatique. De façon générale, les montagnes fournissent davantage d'eau de ruissellement par unité de surface que les terres de plus faible altitude du fait des précipitations plus importantes et de l'évaporation plus faible qui s'y produisent. Les glaciers alpins, eux aussi, stockent et rejettent de l'eau, mais sur des périodes beaucoup plus longues. Dans de nombreuses régions de haute altitude, la formation du manteau neigeux saisonnier fournit la majeure partie des réserves d'eau douce.

La plupart des glaciers mondiaux, y compris ceux des montagnes, fondent à une cadence de plus en plus rapide. Cependant, la fonte des neiges alimente plus largement encore les cours d'eau dans la plupart des bassins fluviaux à composante cryosphérique et donne souvent un volume d'eau nettement supérieur à celui de la fonte des glaciers.

Sous l'effet du réchauffement climatique, la fonte des glaciers s'accélère, le manteau neigeux diminue, le dégel du pergélisol s'intensifie, les précipitations et les risques naturels deviennent plus extrêmes. À l'avenir, les flux d'eau douce provenant des montagnes deviendront plus erratiques, plus incertains et plus variables. Les changements des périodes et du volume de débit maximum et minimum, l'accroissement de l'érosion et des charges sédimentaires auront des conséquences sur la quantité, la qualité et la périodicité des ressources en eau en aval. Du fait de tempêtes de poussière, d'une pollution atmosphérique et d'incendies de forêt plus fréquents et plus intenses, la poussière, les dépôts de suie de combustion, notamment les dépôts de carbone noir, de même que la prolifération microbienne et algale à la surface de la neige et des glaciers sont de plus en plus fréquents.

Ces phénomènes peuvent accélérer les vitesses de fonte en réduisant l'albédo de la surface jusqu'aux prochaines chutes de neige.

Les conséquences du changement climatique, notamment la hausse des températures, le recul des glaciers, le dégel du pergélisol et la modification des régimes de précipitations, peuvent avoir un impact sur les risques d'inondation et de glissement de terrain. De même, les phénomènes associés à ces risques, tels que les coulées de débris et les crues, les avalanches, les chutes de pierres et de glace, les inondations provoquées par la rupture de barrages ou la vidange brutale de lacs glaciaires, peuvent constituer des menaces importantes pour les communautés, la faune et la flore ainsi que pour les infrastructures.

Alimentation et agriculture

L'agriculture et l'élevage assurent une bonne part de la subsistance des habitants des régions montagneuses rurales. Toutefois, dans les pays en développement, l'insécurité alimentaire touche un habitant sur deux de ces régions. L'éloignement et l'inaccessibilité comme la dégradation des sols (générant des sols de mauvaise qualité) et les fortes variations saisonnières de l'approvisionnement en eau, sont autant de facteurs qui rendent difficile la pratique de l'agriculture en montagne.

Les communautés des régions montagneuses cultivent des variétés végétales et des plantes médicinales parmi les plus rares. Grâce aux connaissances et aux méthodes traditionnelles qu'elles ont acquises au fil du temps dans les domaines de la culture, de l'élevage et de la collecte de l'eau, elles contribuent à la préservation d'écosystèmes entiers.

Les peuples autochtones qui vivent dans les montagnes disposent de savoirs, de traditions et de pratiques culturelles propres, uniques et précieux qui leur ont permis de se doter de systèmes alimentaires durables, d'assurer la gestion des terres et de préserver la biodiversité. La culture en terrasse, par exemple, se prête aux reliefs pentus que l'on trouve dans les régions montagneuses. Elle offre de nombreux avantages parmi lesquels la diminution du ruissellement des eaux de surface, la conservation des ressources en eau, la réduction de l'érosion des sols, la stabilisation des pentes, l'amélioration de l'habitat et de la biodiversité, ainsi que la préservation du patrimoine culturel.

Les mesures visant à lutter contre les effets du changement climatique dans les régions montagneuses diffèrent considérablement en termes d'objectifs et de priorités. La rapidité de leur mise en œuvre, les dispositifs de gouvernance, les modalités de prise de décision et l'ampleur des ressources financières ou autres allouées à leur mise en œuvre varient également. Le plus souvent, les mesures d'adaptation comprennent la modification des pratiques agricoles, le développement des infrastructures, notamment aux fins du stockage de l'eau, le recours aux savoirs autochtones, le renforcement des capacités au niveau local et l'adaptation écosystémique.

Établissements humains et réduction des risques de catastrophe naturelle

Les régions montagneuses abritent environ 1,1 milliard de personnes, dont les deux tiers vivent dans des villages et des villes. L'isolement des communautés de montagne, les terrains accidentés et l'exposition accrue aux risques naturels entraînent souvent des coûts plus élevés pour les transports, les infrastructures, les biens et les services. Ceci pose aussi des défis particuliers en termes de financement, de développement et d'entretien des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement, des réseaux d'égouts et d'autres infrastructures hydrauliques essentielles.

• • •

L'isolement des communautés de montagne, les terrains accidentés et l'exposition accrue aux risques naturels entraînent souvent des coûts plus élevés pour les transports, les infrastructures, les biens et les services

Dans les régions montagneuses, l'urbanisation rapide et incontrôlée exerce également une pression sur des écosystèmes montagneux fragiles, compromettant la disponibilité, la qualité et la sûreté des ressources en eau. La mise en place de systèmes d'approvisionnement en eau et de systèmes d'assainissement décentralisés peut avoir des retombées particulièrement probantes dans ces régions, réduisant les risques d'endommagement des infrastructures sur des terrains accidentés, sujets à des glissements fréquents.

Par ailleurs, les catastrophes naturelles tels les glissements de terrain, les tremblements de terre, les inondations, les coulées de boue et les avalanches peuvent endommager les infrastructures de distribution d'eau et d'assainissement et ainsi perturber l'accès à l'eau comme aux services d'assainissement et d'hygiène. Ces risques accentuent la vulnérabilité de communautés déjà fragiles et souvent marginalisées, et déstabilisent certains secteurs dont celles-ci tirent leur subsistance comme l'agriculture, le tourisme et la biodiversité.

Parmi les mesures d'adaptation mises en place dans les régions montagneuses, on compte des études de faisabilité de la construction d'infrastructures de stockage d'urgence et de dérivation comme de contrôle des rejets des lacs glaciaires, la gestion des bassins fluviaux et la planification de leur optimisation, le suivi des changements chronologiques des glaciers et la mise en place de systèmes de réduction des risques de vidange brutale des lacs glaciaires et d'alerte précoce dans les bassins fluviaux glaciaires.

Industrie et énergie

Les industries consommatrices d'eau se sont développées dans les régions montagneuses car l'eau et d'autres ressources y sont relativement abondantes. Outre de servir à la production industrielle et énergétique, l'eau sert également au traitement des minerais, à la production de bois et au développement du tourisme en montagne.

La production hydroélectrique constitue l'un des principaux secteurs d'activité des régions montagneuses. La présence de reliefs et le profil des vallées permettent en effet de produire de l'énergie hydroélectrique sans nécessiter de barrages ou de réservoirs de grandes tailles. La construction et la présence de barrages et de réservoirs, de câbles et de sous-stations peuvent avoir toutefois des effets néfastes notables sur les écosystèmes montagneux fragiles.

Outre à la disponibilité des ressources en eau, le secteur de l'industrie et de l'énergie se heurte à un autre défi de taille, à savoir l'altitude à laquelle il est possible d'opérer. De telles conditions pouvant générer des coûts d'investissement et de fonctionnement considérables, les activités industrielles se limitent généralement à celles dont le retour sur investissement est élevé.

Le développement des secteurs de l'industrie et de l'énergie peut néanmoins compromettre la qualité des ressources en eau. Dans les régions montagneuses isolées, il peut être difficile d'appliquer une réglementation, ce qui entraîne des prélèvements d'eau et des rejets incontrôlés, y compris de polluants.

Des solutions existent ou sont en cours d'élaboration pour rendre l'industrie et la production d'énergie plus durables au sein des régions montagneuses. En vertu d'une économie circulaire, il est notamment possible de réduire l'emploi des ressources en eau ou de les réutiliser comme de recycler les eaux usées. Les pratiques respectueuses de l'environnement englobent des technologies moins polluantes, une meilleure gestion des ressources et un recyclage efficace des déchets. Enfin, la transformation des infrastructures grises en infrastructures vertes ou leur remplacement par ces dernières peut s'avérer particulièrement efficace dans les régions montagneuses.

• • •

Outre de servir à la production industrielle et énergétique, l'eau sert également au traitement des minerais, à la production de bois et au développement du tourisme en montagne

Environnement

Les écosystèmes des montagnes et des hauts plateaux fournissent des services écosystémiques essentiels aux personnes qui y vivent ainsi qu'aux milliards d'habitants des zones de plus basse altitude qui y sont rattachées. Parmi les services les plus importants figurent les services de régulation de l'eau (notamment le stockage de l'eau et la régulation des inondations).

La réduction des risques d'érosion et de glissements de terrain, la baisse des températures locales, la séquestration du carbone, la fourniture de nourriture et de fibres ainsi que le maintien d'un ensemble de ressources génétiques pour des cultures et du bétail adaptés aux conditions locales font aussi partie de ces services.

Les forêts couvrent environ 40 % des régions montagneuses, apportant une protection contre les catastrophes naturelles du fait de leur capacité à stabiliser les pentes abruptes, à réguler l'écoulement des eaux souterraines, à réduire le ruissellement de surface et l'érosion des sols ainsi qu'à atténuer les risques de glissements de terrain et d'inondations. A contrario, des pratiques d'arboriculture non durables peuvent aggraver l'érosion des sols et réduire l'infiltration des eaux.

En montagne, les sols se constituent sous des conditions climatiques difficiles. Moins profonds et plus vulnérables à l'érosion, ils se distinguent nettement des sols des terrains de basse altitude. Ils sont aussi souvent et plus facilement dégradés par les activités humaines qui notamment éliminent la végétation et mettent les sols à nu. Or, à haute altitude, la régénération des sols dégradés et, partant, des écosystèmes, est un processus long.

Au niveau des écosystèmes, la plupart des solutions visant à remédier aux impacts des changements au sein de la cryosphère et des hautes montagnes consistent à conserver ou à restaurer la fonctionnalité des écosystèmes afin de maintenir ou d'améliorer les services écosystémiques à l'échelle locale ou régionale par le biais de solutions fondées sur la nature ou d'adaptations écosystémiques. Ces approches sont désormais considérées comme des outils d'adaptation faisant partie des contributions nationales de nombreux pays montagneux dans le monde.

Perspectives régionales

Afrique subsaharienne

Sur le continent africain, 20 % des terres émergées appartiennent à la catégorie des reliefs d'altitude supérieure à 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, dont 5 % dépassent une altitude supérieure à 1 500 mètres. L'Afrique de l'Est y est la région la plus montagneuse. Riches en biodiversité, ces régions montagneuses fournissent des services écosystémiques, notamment des ressources en eau, à des millions de personnes. En Afrique subsaharienne tropicale et subtropicale, les montagnes offrent des conditions environnementales plus favorables et des ressources plus avantageuses que les terres de basse altitude alentour, généralement plus arides.

La production agricole et la sécurité alimentaire au sein des régions montagneuses comme des terres de plus basse altitude situées en aval dépendent largement des eaux de montagne. Or, les écosystèmes montagneux se dégradent, ce qui réduit leur capacité à stocker et à fournir de l'eau en aval. La destruction de forêts de montagne d'une importance cruciale en est un exemple frappant.

Étant donné que l'agriculture constitue le principal moyen de subsistance dans les montagnes d'Afrique subsaharienne, il est essentiel d'améliorer les pratiques agricoles afin de réduire la dégradation des terres et de promouvoir la conservation des sols. Le recours

à des mesures d'adaptation écosystémique (le reboisement et la protection des forêts de montagne pour lutter contre l'érosion des sols par exemple) peut améliorer la rétention d'eau et la recharge des aquifères tout comme réduire les risques de catastrophes naturelles.

Dans les montagnes de la région, les taux de croissance démographique et la densité de population sont élevés, la pauvreté y est répandue et il n'existe pas ou peu de moyens de subsistance alternatifs et résilients. De façon générale, les montagnes sont plus densément peuplées que les basses terres.

Europe et Asie centrale

En Europe et en Asie centrale, de nombreux cours d'eau trouvent leur source dans les chaînes de montagnes. La fonte des neiges et des glaciers alpins génère un lent écoulement d'eau douce vers les zones en aval. Cependant, du fait du changement climatique, la fonte saisonnière de la neige est plus précoce et les glaciers sont plus petits, rendant moins certaine la disponibilité des ressources en eau pendant l'été. Cette situation est lourde de conséquences pour les populations des bassins en contrebas.

Pour de vastes zones en Europe, les ressources en eau des Alpes revêtent une importance capitale. Les prélèvements d'eau sont principalement destinés à la production hydroélectrique mais servent aussi à l'industrie, à l'irrigation agricole et à l'enneigement artificiel.

Les montagnes des Carpates abritent environ 30 % de la flore européenne. La présence d'habitats semi-naturels tels les pâturages et les prairies de fauche leur confère une grande importance écologique et culturelle.

À travers les montagnes d'Asie centrale, les pays de plus haute altitude sont confrontés à des pénuries d'énergie en hiver, ce qui les pousse à accroître leur production hydroélectrique, tandis que les pays en aval sont largement tributaires de l'eau des montagnes pour leur production agricole en été. Ces demandes saisonnières conflictuelles entraînent des tensions politiques entre pays riverains.

Dans ce contexte, l'amélioration et le partage des connaissances et des informations, le renforcement de la coopération régionale, la consolidation des capacités nationales en matière de gestion de la cryosphère et des eaux de montagne, ainsi que la sensibilisation et la participation des principales parties prenantes à l'élaboration et la mise en œuvre de plans d'action sont nécessaires.

Amérique latine et Caraïbes

En Amérique latine et dans les Caraïbes, les montagnes occupent environ un tiers de la surface du territoire et fournissent des quantités d'eau par unité de surface supérieures à celles de n'importe quel autre continent. Cependant, les glaciers de la région subissent une réduction d'ensemble considérable en volume, plusieurs d'entre eux ayant même complètement disparu.

L'eau provenant des montagnes est indispensable à la production de cultures agricoles de forte valeur comme le café et le cacao. Elle permet également de produire la majeure partie de l'énergie hydroélectrique de la région, alimentant les villes et les petites communautés de basse altitude ainsi que les villages isolés des zones élevées.

Les régions montagneuses d'Amérique latine et des Caraïbes subissent de plus en plus les conséquences du changement climatique et des activités anthropiques. Dans les pays andins, les zones de haute altitude ont été le théâtre de conflits sociaux liés à l'eau, dont beaucoup sont en partie attribuables aux activités minières, qui peuvent avoir une incidence négative sur la disponibilité de l'eau pour les usagers en aval.

En réaction, plusieurs pays ont instauré des politiques et adopté des lois visant à protéger ces écosystèmes essentiels. Cependant, la détérioration de certains d'entre eux a déjà dépassé les seuils critiques, de sorte qu'il est crucial de promouvoir des mesures d'adaptation telles que les solutions fondées sur la nature (notamment le reboisement), des méthodes de culture et l'expansion des infrastructures de collecte de l'eau. La mise en œuvre efficace de ces mesures passe par un financement bien ciblé, un suivi rigoureux, le renforcement de capacités et de cadres de gouvernance inclusifs, favorisant le dialogue et la participation des communautés locales en vue d'employer les meilleures pratiques disponibles dans le respect des contextes locaux propres aux régions montagneuses.

Asie et Pacifique

Plusieurs des plus hauts sommets et des systèmes de glaciers les plus étendus au monde se trouvent dans la région Asie-Pacifique. Ce « troisième pôle » regorge de plus de glace et de neige que toute autre région du monde hors Antarctique et Arctique. Y trouvent leur source plus de dix réseaux fluviaux indispensables à la survie de près de deux milliards de personnes réparties dans les bassins fluviaux de l'Asie centrale, de l'Asie du Nord-Est, de l'Asie du Sud et de l'Asie du Sud-Est. Abritant une grande variété de cultures, ce troisième pôle est également l'une des régions les plus diversifiées sur le plan biologique mais aussi l'une des plus fragiles sur le plan écologique.

Les glaciers de haute montagne de la région disparaissent à un rythme alarmant, souvent plus rapide que la moyenne mondiale. À long terme, la réduction des flux d'eau et l'augmentation des sécheresses devraient compromettre la sécurité alimentaire, hydrique, énergétique ainsi que les moyens de subsistance dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch.

L'emploi d'énergie, la dégradation de l'environnement et l'activité anthropique entraînent d'autres problèmes tels que la présence accrue de carbone noir, de métaux lourds et de polluants organiques persistants au sein de ce troisième pôle.

De fait, il faut que les différents acteurs et secteurs touchés par ces évolutions se mettent à collaborer. En effet, la fonte des glaciers et les crises liées à l'eau nécessitent l'application de mesures d'adaptation renforcées, une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et des solutions synergiques pour le climat, la nature et la pollution, soutenues par une collaboration transfrontalière, un dialogue régional ainsi que des actions de plaidoyer et de sensibilisation.

Région arabe

Les montagnes de la région arabe ne sont pas souvent prises en considération en dépit de leur rôle majeur dans l'apport de ressources en eau et d'autres services écosystémiques. Des communautés prospères y vivent et s'y sont développés des centres d'activité économique axés sur le tourisme, l'agriculture et l'industrie, qui dépendent souvent de la disponibilité de moins en moins stable des ressources en eau douce, qui se traduit par une diminution de la quantité d'eau disponible par habitant.

L'eau de fonte peut jouer un rôle crucial pour le secteur agricole, en particulier pour l'irrigation des cultures pendant l'été lorsque les précipitations sont limitées. La fonte des neiges assure la majeure partie de la recharge de certaines nappes phréatiques. Sur le mont Liban et les montagnes de l'Atlas, les chutes de neige saisonnières et les précipitations globales devraient diminuer, entraînant une modification de la durée et de l'épaisseur du manteau neigeux ainsi que de la disponibilité des ressources en eau douce. Ces prévisions de réduction du manteau neigeux précèdent une diminution générale de l'approvisionnement en eau, en particulier pendant la saison sèche lorsque le besoin d'irrigation est important. À long terme, les services de distribution d'eau, d'assainissement et d'hygiène peuvent également pâtir de la réduction de toutes les ressources hydriques.

• • •

Les glaciers de haute montagne disparaissent à un rythme alarmant

• • •

Il est nécessaire de renforcer les infrastructures d'observation en zones de haute montagne

Pour faire face à cette situation, des mesures d'adaptation peuvent être mises en œuvre dont la gestion de la recharge des aquifères. Collecter l'eau en hiver peut servir à atténuer une moindre disponibilité de l'eau en été et à contrer les effets du changement climatique sur les régions montagneuses de la région arabe, notamment la perte du manteau neigeux.

Renforcement des savoirs et des capacités

Compte tenu de la grande variabilité du climat, de la topographie, de la géologie et de la végétation des régions montagneuses – autant de facteurs qui influent le parcours de l'eau à travers l'espace naturel –, il est indispensable de mettre en place des réseaux hydrométéorologiques représentatifs et de solides systèmes d'information.

Le manque de surveillance de la cryosphère de montagne exacerbé les incertitudes des prévisions hydroglaciologiques et accroît le risque d'une mauvaise gestion des ressources en eau. C'est pourquoi, si l'on veut comprendre les changements cryosphériques et rendre plus durables les méthodes d'atténuation et d'adaptation, il est nécessaire de renforcer les infrastructures d'observation en zones de haute montagne et fournir ces données en accès libre.

Renforcer nos capacités collectives à faire face à l'évolution des conditions cryosphériques en montagne et des conditions hydrologiques en aval supposent d'établir un dialogue et une collaboration sérieuse avec les peuples autochtones et les communautés locales, sous réserve de leur consentement préalable et éclairé, et de tirer des enseignements de la gestion des systèmes hydriques qu'ils ont développée au fil des générations.

Les capacités institutionnelles peuvent inclure le temps et les ressources nécessaires à la concertation entre personnes et l'échange de points de vue. Les modèles de gouvernance collaborative impliquent souvent des compromis qui, bien qu'avantageux pour la société à long terme, peuvent déplaire aux bénéficiaires actuels du statu quo.

Les projets de science participative peuvent offrir des occasions de faire interagir le public avec son environnement local, d'améliorer la culture scientifique et de promouvoir des carrières scientifiques. Les collaborations entre organismes de recherche et groupes associatifs, dans le cadre desquelles des chercheurs élaborent des méthodes ainsi que des programmes d'éducation et de formation, sont fréquemment employées pour garantir que toutes ces dimensions sont prises en compte. Lors de tels processus, il convient de s'assurer que les communautés locales participent à la définition du périmètre du projet afin de garantir que les résultats obtenus répondent à leurs besoins.

Gouvernance et financement

Le rôle de la gouvernance de l'eau dans les régions montagneuses n'a pas fait l'objet d'autant d'attention que la gouvernance de l'eau dans les terres de plus basse altitude à propos de laquelle de nombreux travaux ont été réalisés, notamment dans le cadre de la GIRE.

Les politiques internationales fournissent un cadre propice à la gouvernance de l'eau comme à l'adaptation au changement climatique dans les montagnes. De fait, les traités et les conventions constituent des catalyseurs pertinents qui favorisent la coopération et l'action à l'échelle des régions montagneuses.

La plupart des grands fleuves prennent leur source dans ces régions avant de traverser plusieurs frontières nationales. Une gouvernance transfrontière de l'eau, basée sur une approche à l'échelle des bassins qui tienne compte des eaux de montagne, peut être bénéfique aux pays riverains. En effet, la coopération régionale entre pays, y compris les

• • •

Dans certains cas, les politiques nationales relatives à l'eau, à l'agriculture, à l'industrie et à l'énergie sont élaborées de manière à favoriser les régions de faible altitude au sein des bassins hydrographiques

initiatives de gouvernance au niveau des bassins hydrographiques, est un mécanisme essentiel pour faire progresser l'adaptation au changement climatique dans les montagnes. Toutefois, cette coopération se heurte à des divergences d'intérêts nationaux dans le cadre des accords sur les eaux transfrontalières ainsi qu'à l'inefficacité des institutions à assurer une coordination dans le contexte local.

La gestion des eaux de montagne s'effectue principalement à l'échelle des pays au moyen de lois, de politiques et de stratégies nationales. Dans certains cas, les politiques nationales relatives à l'eau, à l'agriculture, à l'industrie et à l'énergie sont élaborées de manière à favoriser les régions de faible altitude au sein des bassins hydrographiques, afin notamment de bénéficier à des zones plus peuplées. Il est rare qu'elles tiennent pleinement compte des problématiques sectorielles propres aux montagnes relativement à l'eau ; au contraire, elles ont tendance à envisager les montagnes uniquement comme des sources d'approvisionnement pour les usagers en aval.

Le développement des régions de haute altitude occasionne généralement plus de dépenses et de difficultés que celui des territoires de plus basse altitude en raison du relief accidenté et du manque d'accès, des limites imposées aux économies d'échelle, de l'éloignement des ports maritimes et des centres d'affaire ainsi que du faible développement des secteurs de l'industrie et des services. Plus la zone est isolée et en altitude, plus les coûts liés au transport, à l'infrastructure, aux biens et aux services augmentent. C'est là un aspect dont il faut tenir compte dans les politiques et les financements, et qui justifie la mise en place de politiques et de programmes spécifiques aux montagnes dans le cadre des plans de développement nationaux et mondiaux.

Exploiter pleinement le potentiel d'adaptation au changement climatique des montagnes requiert un financement approprié comme la participation et la contribution du secteur privé. En dépit des fonds considérables qui pourraient être investis dans le développement durable des régions montagneuses, l'accès aux principaux programmes d'aide a été relativement réduit. Malgré son intérêt, cette solution non négligeable reste donc insuffisamment appliquée. C'est dire, de façon plus précise, que des fonds internationaux, régionaux, nationaux et locaux, aux visées innovantes et à la valeur raisonnable, pourraient être mobilisés afin d'aider à la planification et au développement des infrastructures dans les secteurs de l'eau, de l'agriculture et de l'énergie.

Coda

Les montagnes fournissent une eau vitale à des milliards de personnes et d'innombrables écosystèmes. Véritables châteaux d'eau de la planète, elles jouent un rôle critique pour le développement durable, qui ne peut être ignoré.

Si l'on veut mieux comprendre et protéger ces environnements fragiles, de plus en plus menacés par le changement climatique et les activités humaines non durables, il nous faut agir.

Car rien de ce qui a lieu dans les montagnes ne reste dans les montagnes.

D'une façon ou d'une autre, **nous vivons tous en aval d'une montagne**.

Prologue

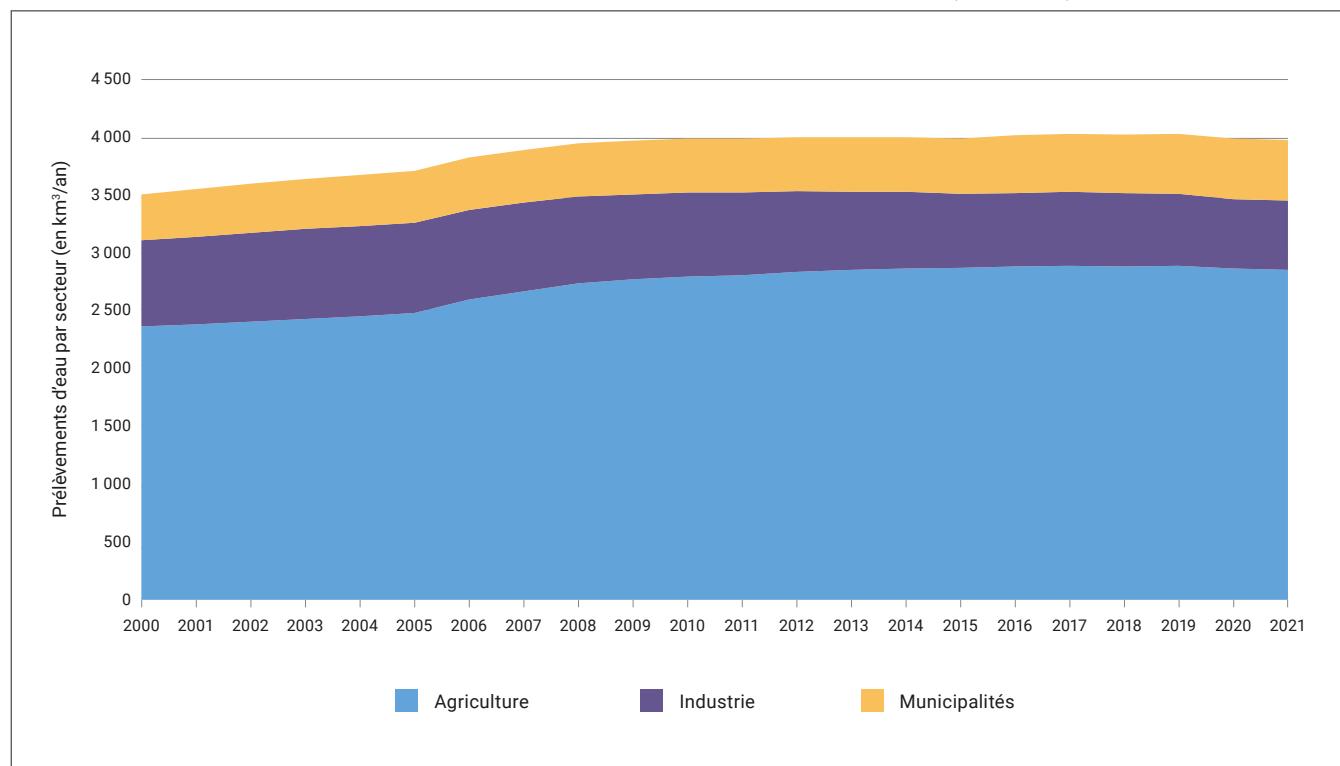
WWAP de l'UNESCO
Richard Connor, Chorong Ahn et Beobkyung Kim

Ressources en eau : évolution de la demande et de la disponibilité

Selon les estimations mondiales les plus récentes (datées de 2021), l'agriculture exploite 72 % des volumes d'eau prélevés, suivie par l'industrie (15 %) et les usages domestiques/municipaux (13%) (figure P.1).

Au cours de la période 2000-2021, les prélèvements mondiaux d'eau douce ont augmenté de 14 % (passant de 3 500 km³ en 2000 à un peu moins de 4 000 km³ en 2021), ce qui correspond à un taux moyen d'augmentation de 0,7 % par an. Toutefois, cette augmentation ne s'est pas faite de manière uniforme dans tous les secteurs. En effet, la plus forte augmentation concerne les usages agricoles (qui comprennent l'eau prélevée à des fins d'irrigation, d'élevage et d'aquaculture), suivie par les usages municipaux (qui comprennent principalement l'eau prélevée pour la consommation directe des personnes). Les volumes d'eau douce prélevés par l'industrie (autonome) ont chuté de près de 20 % au cours de la période considérée (tableau P.1).

Figure P.1 Prélèvements mondiaux d'eau par principaux secteurs d'emploi, 2000-2021 (en km³/an)



Source : auteurs, à partir de données d'Aquastat (FAO, s.d.).

Ces taux varient considérablement selon le niveau de développement économique des pays. En effet, les pays à revenu élevé utilisent davantage d'eau pour l'industrie quand les pays à faible revenu utilisent 90 % (ou plus) de leurs ressources en eau à des fins d'irrigation agricole (figure P.2).

Tableau P.1 Prélèvements d'eau douce dans le monde par secteur, 2000 et 2021

Année	Agriculture		Industries		Municipalités	
	Volume (en km ³)	Part du total (en %)	Volume (en km ³)	Part du total (en %)	Volume (en km ³)	Part du total (en %)
2000	2 365	67	746	21	396	11
2021	2 855	72	601	15	528	13

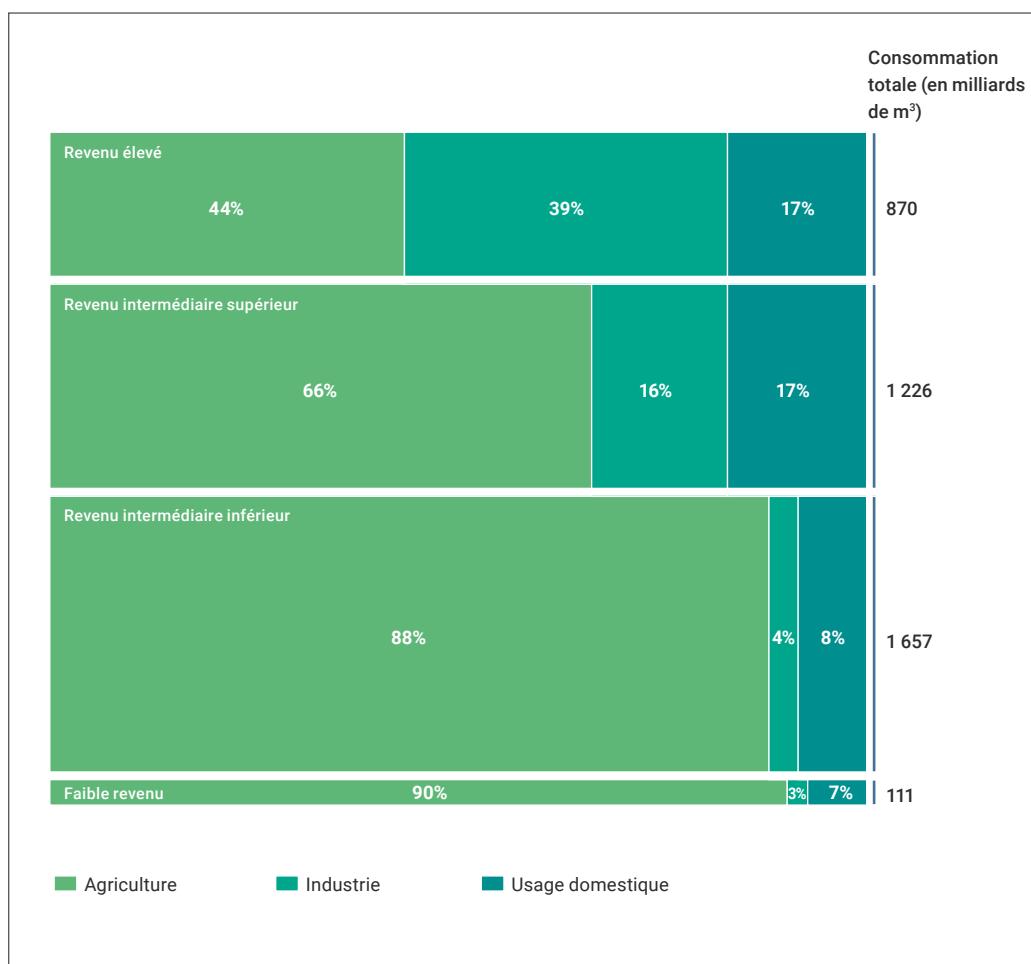
Source : auteurs, à partir de données d'Aquastat (FAO, s.d.).

Figure P.2

Prélèvements d'eau par secteur (en % du total des prélèvements d'eau douce) par niveau de revenu, 2020

Note : Les données concernant le secteur « Usage domestique » dans la figure ci-dessus correspondent à celles du secteur « Municipalités » dans la figure P.1 et le tableau P.1.

Source : Kashiwase et Fujs (2023, à partir de données d'AQUASTAT). Licence CC BY 3.0 IGO.



Il convient toutefois de noter que l'on ignore dans quelle mesure la diminution des prélèvements d'eau par le secteur industriel mentionnée ci-dessus résulte de l'amélioration de l'efficacité d'emploi de cette ressource par les industries dans les pays à revenu élevé et intermédiaire supérieur – c'est là un sujet qui pourrait mériter un examen approfondi.

On sait combien il est difficile d'évaluer avec précision l'évolution de la demande en eau (ONU, 2023). De manière générale, les accroissements sont surtout dus au développement socio-économique et à l'évolution des modes de consommation, notamment des régimes alimentaires. L'augmentation de la demande en eau concerne principalement les villes, les pays et les régions qui connaissent un développement économique rapide, en particulier dans les économies émergentes. La croissance démographique, en revanche, ne semble pas influencer de manière significative cette demande. De fait, les pays où la consommation en eau par habitant est la plus faible, parmi lesquels plusieurs pays d'Afrique subsaharienne, sont souvent ceux dont la population augmente le plus rapidement (ONU, 2024a).

Bien qu'il en existe plusieurs définitions, la disponibilité (ou la rareté) de l'eau peut être considérée comme une mesure purement volumétrique tandis que le stress hydrique correspond à la disponibilité mesurée relativement à la demande (soit la possibilité, ou l'impossibilité, de répondre à la demande en eau des êtres humains et du milieu).

• • •
L'augmentation de la demande en eau concerne principalement les villes, les pays et les régions qui connaissent un développement économique rapide

Vingt-cinq pays, abritant un quart de la population mondiale, sont exposés à un stress hydrique « extrêmement élevé » chaque année (Kuzma et al., 2023). La disponibilité de l'eau varie généralement en fonction du lieu et du moment, de sorte que les moyennes annuelles peuvent masquer de graves pénuries d'eau (c'est-à-dire un stress hydrique) qui peuvent survenir au cours de mois ou saisons spécifiques tout au long de l'année. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime que près de 4 milliards de personnes, soit la moitié de la population mondiale, sont confrontées à de graves pénuries d'eau pendant au moins une partie de l'année (GIEC, 2023).

Le changement climatique accroît la variabilité saisonnière ainsi que l'incertitude concernant la disponibilité des ressources en eau dans la plupart des régions (UNESCO/ONU-Eau, 2020 ; GIEC, 2023). La pollution, la dégradation des sols et des écosystèmes ainsi que les risques naturels peuvent compromettre davantage la disponibilité de ces ressources et mettre à mal les secteurs qui en dépendent.

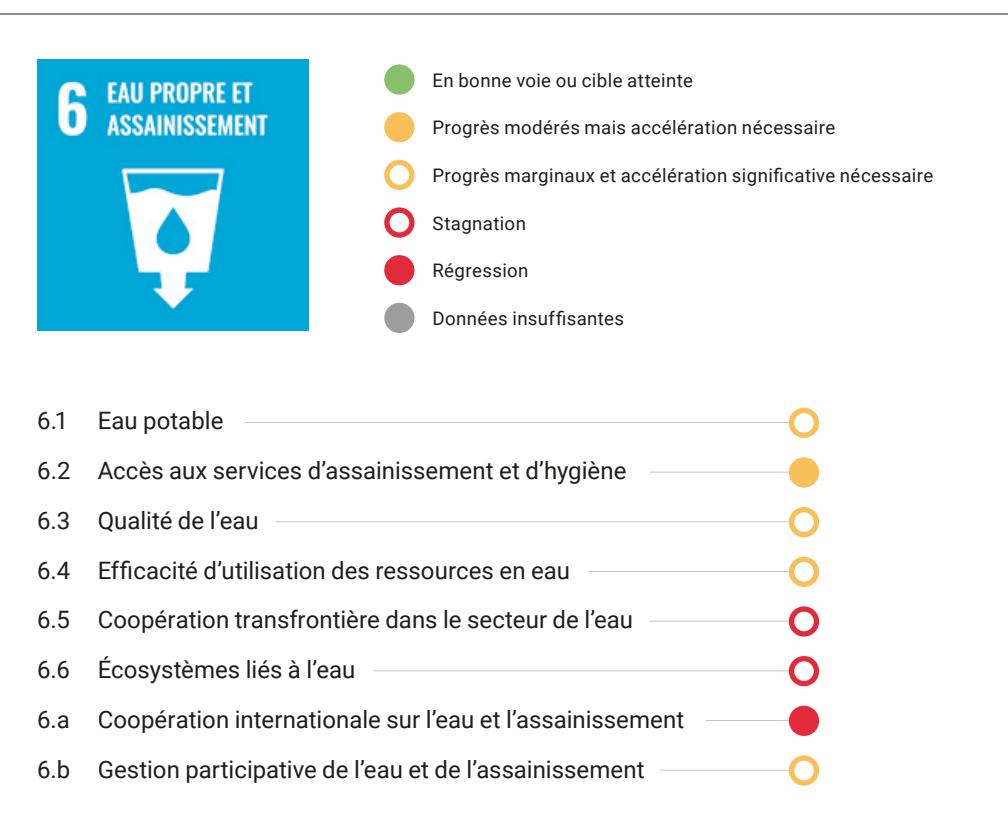
Les progrès accomplis dans la réalisation de l'ODD 6

Le sixième objectif de développement durable (ODD 6) vise à garantir la disponibilité et la gestion durable des ressources en eau et de l'assainissement pour toutes et tous. Il concerne les problématiques relatives à l'eau potable, l'assainissement et l'hygiène, la gestion durable des ressources en eau, la qualité de l'eau, la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), les écosystèmes liés à l'eau et la création d'un environnement propice.

La réalisation des cibles de l'ODD 6 n'est pas en bonne voie ; pour certaines d'entre elles, le retard accumulé est même très important (figure P.3). Les manques de données et de suivi continuent d'entraver les évaluations précises et la mise en œuvre efficace des interventions nécessaires¹.

Figure P.3

État de réalisation des cibles de l'ODD 6 en 2024



Source : ONU (s.d.a).

¹ Pour obtenir des mesures détaillées et à jour, des informations complémentaires ainsi que des liens vers des rapports de fond sur les progrès réalisés sur l'ensemble des cibles et indicateurs de l'ODD 6, veuillez consulter le site www.sdg6data.org/fr.

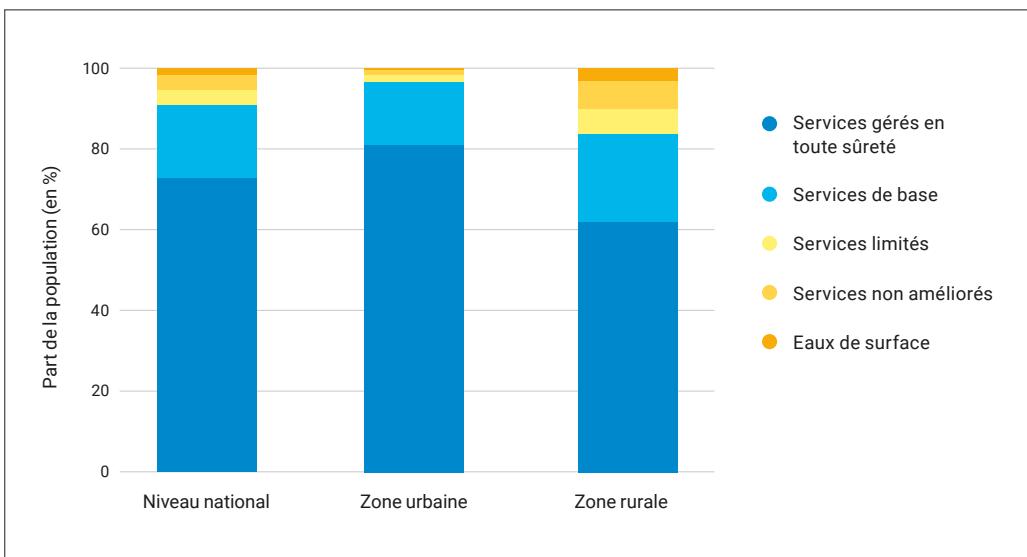
Cible 6.1 : Eau potable

En 2022, quelque 2,2 milliards de personnes (27 % de la population mondiale) n'avaient pas accès à des services d'alimentation en eau potable gérés de façon sûre (figure P4). Parmi les personnes n'ayant pas accès à des services de distribution d'eau potable, quatre sur cinq vivent en zone rurale. Les disparités de distribution entre zones urbaines et zones rurales étaient les plus importantes en Afrique subsaharienne, en Amérique latine et dans les Caraïbes (UNICEF/OMS, 2023).

Figure P.4

Proportion de la population utilisant des services d'alimentation en eau potable gérés de façon sûre, 2022

Source : ONU (s.d.b, à partir de données de UNICEF/OMS (2023)).



Cible 6.2 : Accès aux services d'assainissement et d'hygiène

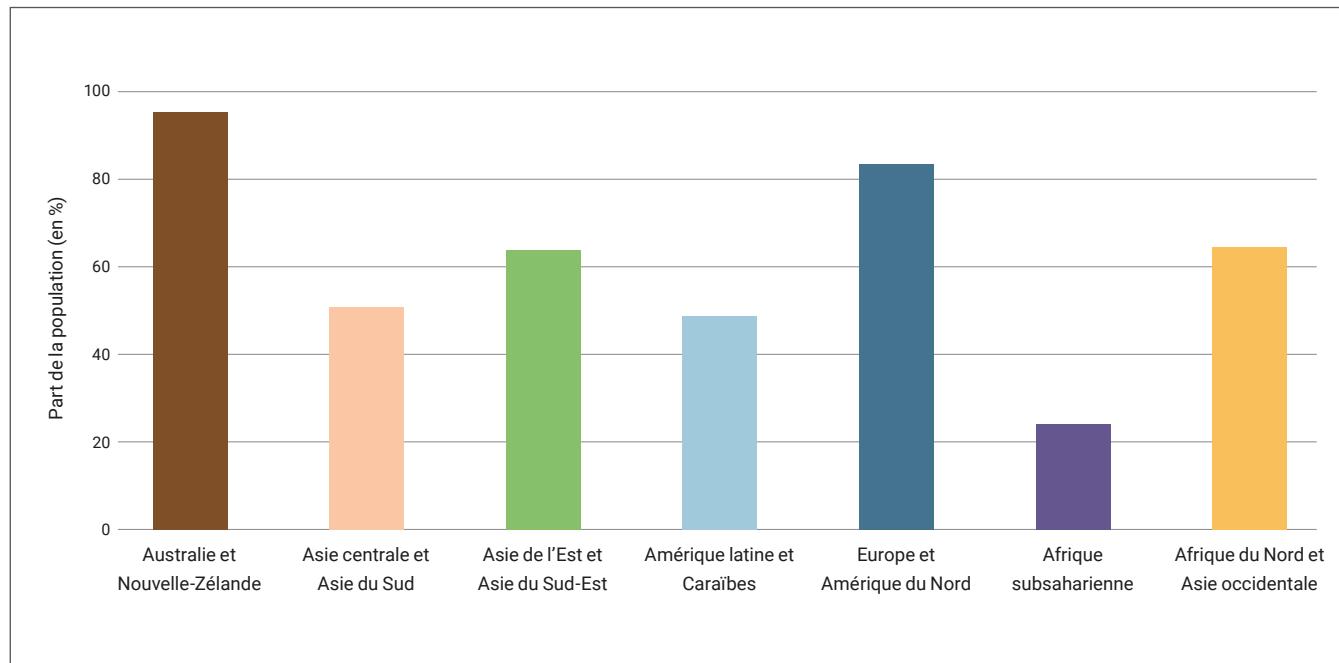
En 2022, 3,5 milliards de personnes dans le monde n'avaient pas accès à des services d'assainissement gérés de façon sûre (UNICEF/OMS, 2023). La situation est particulièrement désastreuse en Afrique subsaharienne, où seuls 24 % de la population utilise ce type de services. Le manque d'accès persiste également dans d'autres régions telles l'Amérique latine et les Caraïbes ainsi que l'Asie centrale et l'Asie du Sud, où seule la moitié de la population a accès à ces services (figure P.5).

Cible 6.3 : Qualité de l'eau

L'indicateur 6.3.1 des ODD permet d'évaluer la proportion d'eau usée d'origine industrielle et domestique traitée de façon sûre, conformément à des normes nationales ou locales. La composante domestique comprend les eaux usées et les boues fécales, traitées sur site ou hors site, et présente des liens avec l'indicateur 6.2.1a relatif à l'assainissement. Malheureusement, « on constate un manque alarmant de données statistiques sur les eaux usées communiquées par les pays et ce, partout dans le monde » tandis que « les données dont on dispose ne suffisent pas à établir des statistiques mondiales sur la proportion des eaux usées traitées et celles traitées de façon sûre » (ONU-Habitat/OMS, 2024, p. xiii).

En 2023, selon des données relatives à 91 000 plans d'eau dans 120 pays, 56 % d'entre eux avaient de l'eau de bonne qualité (ONU, 2024b). « Toutefois, de nombreux pays à faible revenu et à revenu intermédiaire inférieur n'ont pas les capacités de collecter des données ni d'établir des rapports de suivi des principaux indicateurs de qualité de l'eau. En 2023, plus de 2 millions d'analyses qualitatives de l'eau ont été effectuées pour le suivi de cet indicateur [6.3.2], mais les pays qui appartiennent à la moitié du monde aux revenus les plus faibles n'en ont effectué que moins de 3 % (60 000) du total » (PNUE, 2024a, p. ix à x).

Figure P.5 Proportion de la population utilisant des services d'assainissement gérés de façon sûre (indicateur 6.2.1a des ODD) dans différentes régions, 2022



Source : ONU (s.d.c, à partir de données de UNICEF/OMS (2023)).

Cible 6.4 : Efficacité de l'utilisation des ressources en eau et niveau de stress hydrique

« L'augmentation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau, par exemple par la réparation des fuites dans les systèmes de distribution d'eau, le passage à des cultures moins gourmandes en eau et l'investissement dans les nouvelles technologies, se traduit par une meilleure durabilité des systèmes de production alimentaire et industrielle. Les économies d'eau sont souvent associées aux économies d'énergie, car des quantités d'eau moins importantes doivent être extraites, traitées, transportées et chauffées » (ONU, s.d.d). L'indicateur 6.4.1 reflète les variations d'efficacité d'emploi de l'eau dans le temps ; il est calculé à partir du rapport entre la valeur ajoutée monétaire et le volume d'eau utilisé.

L'efficacité d'emploi des ressources en eau varie considérablement selon la structure économique d'un pays et la répartition de ces ressources entre différents secteurs. Par exemple, « en 2021, les estimations allaient de moins de 3 dollars EU/m³ dans les économies dépendantes de l'agriculture à plus de 50 dollars EU/m³ dans les économies de services, hautement industrialisées. Malgré une moyenne mondiale en hausse, environ 58 % des pays affichent encore une faible efficacité d'emploi des ressources en eau (moins de 20 dollars EU/m³) » (ONU, 2024b, p. 21).

Le suivi des niveaux de stress hydrique permet d'estimer la pression exercée par tous les secteurs sur les ressources en eau douce renouvelables d'un pays. En 2021, l'indicateur 6.4.2 des ODD a atteint 18,6 %, soit une augmentation de 2,7 % depuis 2015 (FAO/ONU-Eau, 2024).

Cible 6.5 : Coopération transfrontière dans le secteur de l'eau

Sur les 153 pays partageant des cours d'eau, lacs et aquifères transfrontaliers, seuls 43 ont conclu des accords opérationnels couvrant 90 % ou plus des eaux transfrontalières. Seuls 26 pays ont mis en place de tels accords opérationnels pour l'ensemble de leurs bassins transfrontaliers (CEE/UNESCO/ONU-Eau, 2024).

L'indicateur 6.5.1 des ODD permet de suivre la mise en œuvre de la GIRE. « Les progrès mondiaux dans la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau restent toutefois lents, le niveau de mise en œuvre étant passé de 49 % en 2017 à seulement 57 % en 2023. [...] Des efforts considérables doivent être déployés pour accélérer cette mise en œuvre, en particulier en Asie centrale et en Asie du Sud, en Amérique latine et dans les Caraïbes, en Océanie et en Afrique subsaharienne » (ONU, 2024b, p. 21).

Cible 6.6 : Écosystèmes liés à l'eau

Vaste et ambitieuse, cette cible concerne la protection et la restauration des écosystèmes liés à l'eau, notamment les montagnes, les forêts, les zones humides, les cours d'eau, les aquifères et les lacs. Il convient de noter qu'il ne lui est associé aucun indicateur chiffré au niveau mondial. Par conséquent, la cible ne comporte pas de précision sur un niveau d'ambition qui serait évalué selon le nombre ou la superficie des écosystèmes liés à l'eau devant être protégés et/ou restaurés. Cependant, « les données récoltées pour l'ODD 6.6.1 montrent que les écosystèmes liés à l'eau continuent de subir des niveaux de dégradation élevés. Cette dégradation est principalement due à la pollution, aux barrages, à la conversion des terres, aux prélèvements excessifs et au changement climatique » (PNUE, 2024b, p. 2).

Cible 6.a : Coopération internationale dans le secteur de l'eau et de l'assainissement

Les montants d'aide publique au développement (APD) versés au secteur de l'eau n'ont cessé de diminuer de 2018 à 2020 avant d'augmenter de 11 % pour atteindre 9,1 milliards de dollars EU en 2021 (ONU, s.d.e). « Cependant, les montants versés au titre de l'APD au secteur de l'eau, lorsqu'ils sont exprimés en pourcentage de l'APD totale, tous secteurs confondus, ont diminué, tombant à 3,2 % en 2022, un niveau historiquement bas, et leur tendance à la baisse s'est accentuée depuis le début de la pandémie de COVID-19 en 2020 » (OMS, 2024, p. 40).

Cible 6.b : Gestion participative de l'eau et de l'assainissement

En ce qui concerne la gestion de l'eau potable en milieu rural et celle des ressources en eau, plus de 90 % des pays ont déclaré disposer de procédures participatives définies par la loi ou par des mesures politiques au cours de la période considérée 2021-2022. En revanche, « moins d'un tiers des pays ont fait état d'une participation élevée ou très élevée des communautés aux processus de planification et de gestion » (OMS, 2022, p. 48).

Références

CEE/UNESCO/ONU-EAU (Commission économique pour l'Europe/ Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture/ ONU-Eau). 2024. *Progrès en matière de coopération dans le domaine des eaux transfrontières : bilan à mi-parcours de l'indicateur 6.5.2 des ODD, avec une attention particulière accordée aux changements climatiques.* Genève/Paris, Organisation des Nations Unies/UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000392272.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). s.d. Système d'information AQUASTAT. Site web de la FAO. data.apps.fao.org/aquastat/?lang=fr (consulté le 2 décembre 2024).

FAO/ONU-Eau (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/ONU-Eau). 2024. *Progress on the Level of Water Stress – Mid-Term Status of SDG Indicator 6.4.2 and Acceleration Needs, with Special Focus on Food Security.* Rome, FAO. doi.org/10.4060/cd2179en.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2023. *Résumé pour les décideurs politiques.* H. Lee et J. Romero (éds), *Climate Change 2023: Synthesis Report.* Contributions des Groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, GIEC, p. 1 à 34. www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (en anglais).

Kashiwase, H. et Fujis, T. 2023. « L'eau douce, une ressource sous pression ». A. F. Pirlea, U. Serajuddin, A. Thudt, D. Wadhwa et M. Welch (éds), *Atlas des objectifs de développement durable 2023.* Washington, Banque mondiale. datatopics.worldbank.org/sdgatlas/goal-6-clean-water-and-sanitation?lang=fr.

Kuzma, S., Saccoccia, L. et Chertock, M. 2023. « 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress ». Site web de l'Institut des ressources mondiales (WRI). www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries.

OMS (Organisation mondiale de la Santé). 2022. *Strong Systems and Sound Investments: Evidence on and Key Insights into Accelerating Progress on Sanitation, Drinking-Water and Hygiene. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS) 2022 Report.* Genève, OMS. https://iris.who.int/handle/10665/365297.

—. 2024. *World Health Statistics 2024: Monitoring Health for the SDGs, Sustainable Development Goals.* Genève, OMS. iris.who.int/handle/10665/376869.

ONU (Organisation des Nations Unies). 2023. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2023 – Partenariats et coopération pour l'eau.* Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384658.

—. 2024a. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 – L'eau pour la prospérité et la paix.* Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388949.

—. 2024b. *The Sustainable Development Goals Report 2024.* New York, Organisation des Nations Unies. unstats.un.org/sdgs/report/2024/.

—. s.d.a. « SDG Progress by Target ». Site web de l'Organisation des Nations Unies. unstats.un.org/sdgs/report/2024/sdg-progress-by-target/ (consulté le 2 décembre 2024).

—. s.d.b. « Progrès réalisés dans le domaine de l'eau de boisson (cible 6.1 des ODD) ». Site web de l'Organisation des Nations Unies. www.sdg6data.org/fr/indicator/6.1.1 (consulté le 2 décembre 2024).

—. s.d.c. « Progrès réalisés dans le domaine de l'assainissement (cible 6.2 des ODD) ». Site web de l'Organisation des Nations Unies. www.sdg6data.org/fr/indicator/6.2.1a (consulté le 4 décembre 2024).

—. s.d.d. « Progrès relatifs à l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau (cible 6.4 des ODD) ». Site web de l'Organisation des Nations Unies. www.sdg6data.org/fr/indicator/6.4.1 (consulté le 4 décembre 2024).

—. s.d.e. « Progrès de la coopération internationale dans le domaine de l'eau (cible 6.a des ODD) ». Site web de l'Organisation des Nations Unies. www.sdg6data.org/fr/indicator/6.a.1 (consulté le 2 décembre 2024).

ONU-Habitat/OMS (Programme des Nations Unies pour les établissements humains/Organisation mondiale de la Santé). 2024. *Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated – Mid-term status of SDG Indicator 6.3.1 and acceleration needs, with a special focus on Climate Change, Wastewater Reuse and Health.* Nairobi/Genève, ONU-Habitat/OMS. www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2024a. *Progress on Ambient Water Quality: Mid-Term status of SDG Indicator 6.3.2 and acceleration needs, with a special Focus on Health.* Nairobi, PNUE. www.unwater.org/publications/progress-ambient-water-quality-2024-update.

—. 2024b. *Progress on Water-Related Ecosystems: Mid-term status of SDG Indicator 6.6.1 and acceleration needs with a special focus on Biodiversity.* Nairobi, PNUE. www.unwater.org/publications/progress-water-related-ecosystems-2024-update.

UNESCO/ONU-Eau (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture/ONU-Eau). 2020. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 – L'eau et les changements climatiques.* Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372941.

UNICEF/OMS (Fonds des Nations Unies pour l'enfance/Organisation mondiale de la Santé). 2023. *Progrès en matière d'eau, d'assainissement et d'hygiène des ménages 2000-2022 : Gros plan sur les questions de genre.* New York, UNICEF/OMS. www.pseau.org/outils/ouvrages/unicef-who_progres_en_matiere_d_eau_d_hygiene_et_d_assainissement_des_menages_2000_2022_gros_plan_sur_les_questions_de_genre_2023.pdf.

Chapitre 1

Introduction

WWAP de l'UNESCO

Richard Connor et Philippus Wester

Avec la contribution de James Thornton (Université de Berne)

• • •

À l'avenir, les flux d'eau douce provenant des montagnes deviendront plus variables, plus erratiques et plus incertains

Les montagnes, dont on dit souvent qu'elles sont les « châteaux d'eau » de la planète, tiennent un rôle unique et essentiel dans le cycle de l'eau terrestre. D'une part, elles influent sur la circulation atmosphérique, qui conditionne les variations climatiques et les régimes de précipitations. D'autre part, elles peuvent stocker de l'eau sous forme de glace et de neige au cours des saisons froides et la libérer au cours des saisons plus chaudes, fournissant ainsi une source majeure d'eau douce aux populations en aval.

Indispensables à la satisfaction des besoins humains fondamentaux, notamment en matière d'approvisionnement en eau et d'assainissement, les eaux de montagne permettent d'assurer la sécurité alimentaire et énergétique (que ce soit par l'agriculture irriguée, la production d'énergie hydroélectrique ou le refroidissement des centrales thermiques) de milliards de personnes vivant dans les régions montagneuses et aux alentours ainsi que dans les zones situées en aval. De plus, elles contribuent à la croissance économique en favorisant de nombreuses industries qui ont besoin d'eau.

Les glaciers alpins², eux aussi, stockent et rejettent de l'eau, mais sur des périodes beaucoup plus longues. Si les glaciers continentaux, notamment ceux de l'Antarctique et du Groenland, stockent de grandes quantités d'eau douce sous forme de glace, les glaciers de montagne ont une incidence beaucoup plus directe sur la disponibilité des ressources en eau douce permettant de répondre aux besoins immédiats et à court terme des êtres humains.

Lorsqu'ils sont en bonne santé, les écosystèmes de montagne assurent un bon nombre de services environnementaux dont la régulation des débits, la recharge des aquifères et la rétention des sédiments. On y trouve souvent des espèces végétales, animales et microbiennes robustes bien que ces écosystèmes soient fragiles et vulnérables aux changements rapides qui affectent le couvert végétal et le climat. Grâce aux processus d'érosion et de sédimentation, les régions montagneuses fournissent également des nutriments essentiels (notamment des minéraux) qui contribuent à la vitalité des écosystèmes terrestres, estuariens et côtiers, et fertilisent les sols en aval. Et pourtant, les régions montagneuses sont largement négligées par les objectifs de développement durable (ODD), exception faite des cibles 6.6, 15.1 et 15.4.

Sous l'effet du changement climatique, la fonte des glaciers s'accélère, le manteau neigeux diminue, le dégel du pergélisol s'intensifie et les précipitations et les risques de catastrophes naturelles deviennent plus extrêmes. À l'avenir, les flux d'eau douce provenant des montagnes deviendront plus variables, plus erratiques et plus incertains. Les changements des périodes et du volume de débit maximum et minimum, l'accroissement de l'érosion et des charges sédimentaires auront des conséquences sur la quantité, la qualité et la périodicité des ressources en eau en aval (Alder et al., 2022). Nombre de stratégies d'adaptation au changement climatique en montagne ont trait à l'eau. Cependant, bien que les régions montagneuses se réchauffent plus rapidement que les terres de plus basse altitude, la vitesse d'implémentation, l'ampleur et la portée des mesures d'adaptation (en grande partie progressives) mises en place au sein des régions montagneuses demeurent insuffisantes pour prévenir les risques futurs qui pèsent sur la sûreté de l'eau dans le monde.

La pollution et la détérioration de la qualité de l'eau en amont se répercutent inévitablement sur les usagers en aval. Bien que l'on dispose de peu d'informations sur l'évolution de la qualité de l'eau dans les régions montagneuses, il existe de plus en plus d'éléments prouvant que les apports solides augmentent dans les zones de haute montagne du fait de changements d'affectation des terres (déforestation par exemple), du changement climatique et de la dégradation de la cryosphère (Li et al., 2021).

² Les glaciers alpins sont des glaciers qui se trouvent confinés entre les versants du terrain montagneux environnant ; on les appelle aussi glaciers de montagne.

La dépendance déjà forte des populations des basses terres à l'égard des eaux de montagne va encore s'accroître d'ici au milieu du siècle, principalement sous l'effet du développement socio-économique. Il est donc urgent d'améliorer la gouvernance des ressources en eau en montagne à travers une gestion intégrée des bassins fluviaux, un meilleur financement, un renforcement des savoirs et des capacités, afin de répondre à une demande mondiale en eau qui ne cesse de croître.

Les précédentes éditions du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* n'ont accordé qu'une attention limitée à la cryosphère³ – dont les glaciers, la dynamique du manteau neigeux et le pergélisol – ou aux systèmes alpins, qui sont étroitement liés.

Dans le sillage du choix de l'année 2025 comme Année internationale de la préservation des glaciers (Assemblée générale des Nations Unies, 2022a) et de l'adoption d'une résolution sur le développement durable dans les régions montagneuses en 2022 (Assemblée générale des Nations Unies, 2022b), le présent rapport vise à rappeler au monde entier l'importance des eaux de montagne, en particulier des glaciers alpins, pour le développement durable des régions montagneuses ainsi que pour les sociétés qui en dépendent, en mettant l'accent sur les impacts des modifications rapides actuelles de la cryosphère de montagne.

Pour ce faire, le présent rapport examine :

- les dynamiques des montagnes et des glaciers alpins ainsi que leur rôle en tant que réservoirs d'eau dans le cycle de l'eau sur Terre, en axant la réflexion sur la gestion des ressources, comme leurs incidences sur l'approvisionnement en eau, le stockage et la qualité de l'eau ;
- les services et les bénéfices que fournissent les eaux de montagne en soutien aux sociétés, aux économies et à l'environnement, en soulignant les défis posés aux usagers (établissements humains, agriculture, industrie par exemple) et les opportunités (bénéfices potentiels) en termes d'approvisionnement en eau et d'assainissement, d'atténuation des effets du changement climatique et d'adaptation à celui-ci, de sécurité alimentaire et énergétique, ainsi que de protection, de restauration et d'entretien des écosystèmes.

Le présent rapport s'efforce également d'aborder les situations à l'échelle des bassins, en prenant en compte la gestion intégrée des ressources en eau, la gestion de la source à la mer, la coopération transfrontière et d'autres concepts interdépendants similaires. Il se concentre néanmoins principalement sur les défis rencontrés en amont et les mesures connexes, en accordant une attention particulière aux glaciers, à la cryosphère et aux systèmes alpins, notamment par l'intermédiaire des dernières données clés mondiales et des savoirs techniques les plus récents.

1.1 Les régions de montagne dans le monde

Depuis la fin des années 1990, plusieurs modèles de délimitation des régions montagneuses du monde ont été mis au point à partir de modèles numériques de relevés altimétriques (Thornton et al., 2022), dont la plus aboutie est celle établie par le Centre mondial de surveillance pour la conservation (WCMC) du Programme des Nations Unies pour l'environnement en 2000 (encadré 1.1 ; Kapos et al., 2000). C'est cette dernière qui sert aujourd'hui de base au suivi dans le cadre du Programme de développement durable à l'horizon 2030.

³ Le terme « cryosphère » désigne la partie de la croûte terrestre recouverte d'eau sous forme solide comme dans le cas des glaciers, des calottes glaciaires, de la neige, du sol gelé en permanence (pergélisol), des lacs et des rivières gelés, des nappes glaciaires et de la glace de mer. La cryosphère est un composant essentiel de l'hydroosphère et du cycle de l'eau sur Terre.

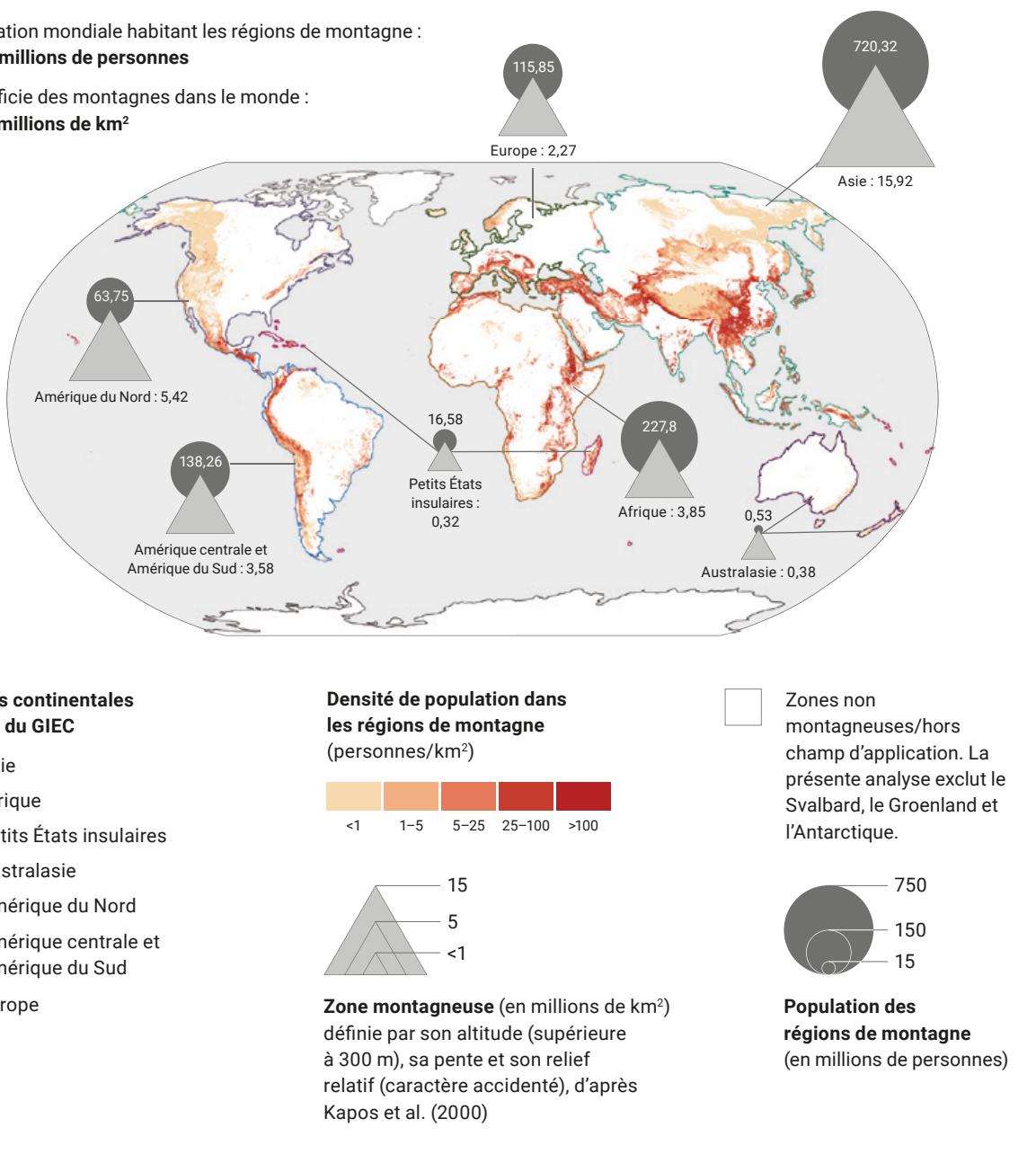
D'après la délimitation du Centre mondial de surveillance pour la conservation, les régions montagneuses possèdent une superficie d'environ 33 millions de km², soit 24 % de la surface terrestre si l'on exclut l'Antarctique (Romeo et al., 2020). En 2015, ces régions abritaient près de 1,1 milliard de personnes (environ 15 % de la population mondiale) (figure 1.1), soit presque deux fois plus qu'en 1975 où la population des régions montagneuses dépassait à peine les 575 millions d'habitants (Thornton et al., 2022). À titre de comparaison, environ 900 millions de personnes vivaient dans les deltas et les régions côtières de faible altitude, îles comprises en 2020 (Glavovic et al., 2022).

En 2017, la majeure partie des habitants des régions montagneuses du monde (environ 91 %) se trouvaient dans des pays en voie de développement. Près de 90 % de toute la population de ces régions vivaient à des altitudes comprises entre 1 500 et 2 500 mètres au-dessus du niveau de la mer, et seulement 75 millions de personnes vivaient à une altitude supérieure (Tremblay et Ainslie, 2021).

Figure 1.1 Délimitation des régions montagneuses et densité de population, 2015

- Population mondiale habitant les régions de montagne : **1 283 millions de personnes**

- Superficie des montagnes dans le monde : **31,74 millions de km²**



Note : GTII du GIEC (Groupe de travail II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ; masl : mètres au-dessus du niveau de la mer.

Source : Adler et al. (2022, figure CCP5.1(a), p. 2278).

Encadré 1.1 Délimiter les régions montagneuses

Afin de délimiter les régions montagneuses, on utilise un ensemble de caractéristiques topographiques, à savoir l'altitude, l'inclinaison de la pente et le relief relatif (caractère accidenté), également appelé amplitude d'altitudes locales (LER), soit la différence entre altitudes minimale et maximale dans une maille donnée.

Pour délimiter les montagnes, le Centre mondial de surveillance pour la conservation du Programme des Nations Unies pour l'environnement utilise des fourchettes d'altitude, tous les terrains situés à plus de 2 500 mètres au-dessus du niveau de la mer étant considérées comme montagneux, quel que soit leur caractère accidenté. Les terrains situés entre 300 et 2 500 mètres au-dessus du niveau de la mer sont considérés comme montagneux si l'inclinaison de la pente ou le caractère accidenté dépassent certains seuils prédéfinis : entre 300 et 1 000 mètres d'altitude, il faut une amplitude d'altitudes locales de plus de 300 mètres par maille d'un rayon de 7 km. Entre 1 000 et 1 500 mètres d'altitude, il faut une pente de plus de 5 degrés ou une amplitude d'altitudes locales de plus de 300 mètres (dans un rayon de 7 km). Et entre 1 500 et 2 500 mètres d'altitude, il faut une pente de plus de 2 degrés. Ces seuils permettent d'exclure les plateaux de moyenne altitude et d'inclure les zones de plus faible altitude généralement considérées comme montagneuses telles que les Highlands écossais (Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord), le Massif central (France) et les basses montagnes des îles des Caraïbes ainsi que les collines et les contreforts vallonnés de plus de 300 mètres au-dessus du niveau de la mer (Kapos et al., 2000).

1.2

Utilisation des eaux de montagne et dépendance à leur égard

• • •

Les montagnes fournissent 55 % à 60 % des flux annuels d'eau douce dans le monde

Véritables châteaux d'eau de la planète, les montagnes constituent, partout dans le monde, une source d'eau douce essentielle à l'agriculture irriguée, à la production énergétique, à l'industrie et aux populations de plus en plus nombreuses et croissantes — que ce soit dans les montagnes ou en aval. De façon générale, du fait des précipitations plus importantes et de l'évaporation plus faible qui s'y produisent, les montagnes fournissent davantage d'eau de ruissellement par unité de surface que les terres de plus faible altitude, dont 55 % à 60 % des flux annuels d'eau douce dans le monde. Toutefois, cette proportion varie de 40 % à plus de 90 % selon les régions (Viviroli et al., 2020). La figure 1.2 illustre les dépendances de diverses régions et populations des basses terres à l'égard des eaux de montagne.

Certains fleuves majeurs dépendent largement de sources d'eau situées en montagne (plus de 90 % de leur débit annuel moyen) ; ceci est notamment le cas de l'Amou-Daria, du Colorado, du Nil, de l'Orange et du Río Negro. D'autres tels l'Euphrate, l'Indus, le São Francisco, le Sénégal et le Tigre dépendent de sources de montagne pour plus de 70 % de leur débit (Viviroli et al., 2020).

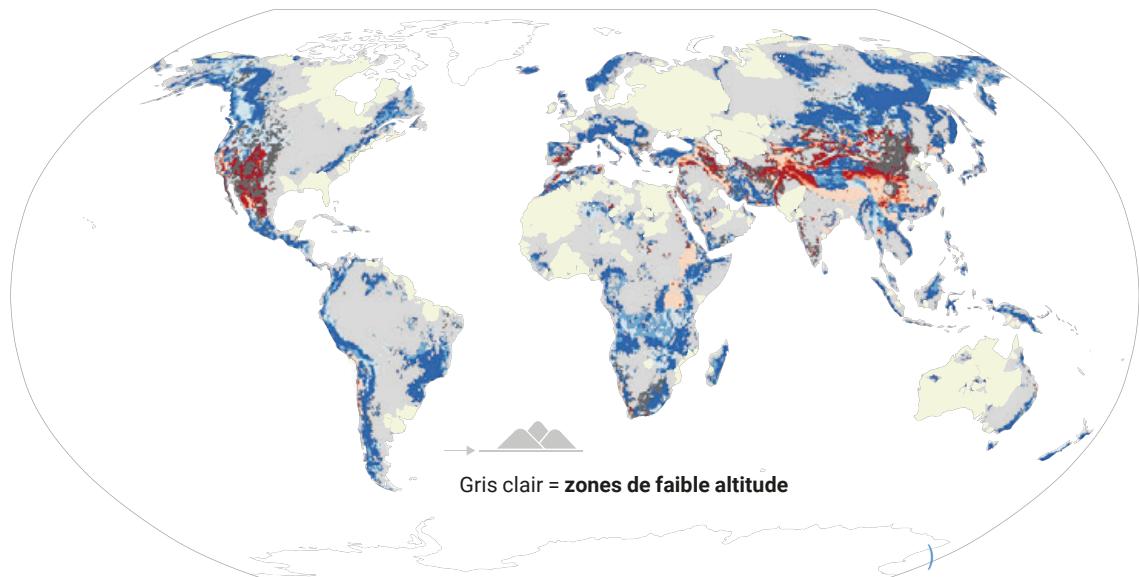
De même, certaines grandes villes sont très dépendantes des eaux de montagne, en particulier Addis-Abeba, Barcelone, Bogota, Jakarta, Katmandou, La Paz, Lima, Los Angeles, Melbourne, Mexico, New Delhi, New York, Quito, Rio de Janeiro et Tokyo (Kohler et al., 2015).

Au sein des régions montagneuses, les principales activités économiques incluent l'agriculture, l'élevage, la sylviculture, le tourisme, l'exploitation minière, le commerce transfrontalier et la production d'énergie (voir chapitre 5). Ces régions produisent des marchandises à forte valeur tels les plantes médicinales, le bois et autres produits forestiers, un bétail particulier (à l'instar des alpagas, des chèvres, des lamas, des vigognes et des yacks) et des spécialités agricoles régionales. Elles constituent aussi des zones sensibles en termes de biodiversité agricole, une grande partie du patrimoine génétique mondial servant à l'agriculture et des plantes médicinales se trouvant dans les zones montagneuses (voir chapitre 6).

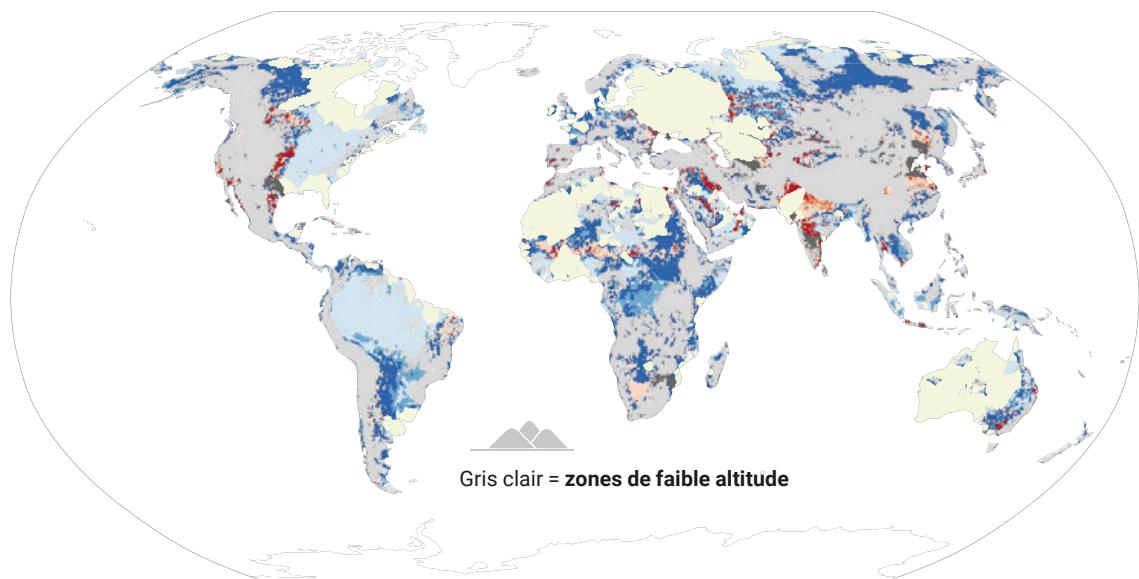
À l'échelle mondiale, jusqu'à deux tiers des cultures irriguées peuvent dépendre des eaux de montagne (voir chapitre 3). De même, le nombre de personnes vivant dans les basses terres et dépendant grandement de l'eau provenant des montagnes a augmenté à l'échelle mondiale, passant d'environ 0,6 milliard dans les années 1960 à quelque 1,8 milliard dans les années 2000. Un milliard de personnes supplémentaires dans ces zones bénéficient d'apports d'eaux de ruissellement provenant aussi des montagnes (Viviroli et al., 2020).

Figure 1.2 Estimations de l'importance future des régions de montagne et de la dépendance des populations, 2041-2050 (SSP2-RCP6.0)

(a) Estimation de l'importance future des régions de montagne pour les ressources en eau des zones de faible altitude (2041-2050, SSP2-RCP6.0)



(b) Estimation de la dépendance future de la population des zones de faible altitude envers les ressources en eau des montagnes (2041-2050, SSP2-RCP6.0)



Degrés d'importance et de dépendance



Source : Adler et al. (2022, figure CCP5.2(a, b), p. 2282).

1.3

Populations et communautés des régions montagneuses

• • •

La plupart des glaciers du monde, y compris ceux des montagnes, fondent à une cadence de plus en plus rapide

À l'échelle mondiale, la majeure partie des zones urbaines (78 %) se trouve en dehors des montagnes (c'est-à-dire dans les basses terres). Toutefois, l'urbanisation revêt également une grande importance dans les régions montagneuses, où une part substantielle (66 %) de toutes les personnes qui y vivent habitent dans des villes et des agglomérations. En 2015, dans le monde, 34 % des habitants des régions montagneuses vivaient dans des villes de plus de 50 000 habitants (contre 50 % dans les basses terres), dont des capitales comme Katmandou, La Paz, Mexico et Quito, 31 % dans des petites villes et des zones à densité modérée (contre 28 % dans les basses terres) et 35 % en zones rurales, c'est-à-dire des constructions avec moins de 300 personnes par kilomètre carré (contre 25 % dans les basses terres) (Ehrlich et al., 2021).

Au sein des régions montagneuses, l'urbanisation rapide pose des problèmes particuliers pour l'installation des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement (voir chapitre 4). L'isolement des communautés de montagne, les terrains difficiles et l'exposition accrue aux risques de catastrophes naturelles entraînent souvent des coûts plus élevés pour les transports, les infrastructures, les biens et les services. Ceci pose aussi des défis particuliers en termes de financement, de développement et d'entretien des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement, des réseaux d'égouts et d'autres infrastructures hydrauliques essentielles. En outre, les données sur la proportion de personnes ayant accès à des services d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement gérés de façon sûre font souvent défaut ou sont incomplètes dans ces régions.

Bien que la plupart des personnes vivant en zone rurale tirent leurs moyens de subsistance de l'agriculture et de l'élevage, la sécurité alimentaire et nutritionnelle est plus faible dans les régions montagneuses que dans les régions de plus basse altitude, 35 % à 40 % des personnes y vivant étant exposées à l'insécurité alimentaire tandis que 50 % souffrent de faim chronique (Romeo et al., 2020). L'insuffisance de la production alimentaire locale peut s'expliquer par l'éloignement, l'inaccessibilité, l'éloignement par rapport aux routes et aux marchés, par des saisons de culture plus courtes, par la grande variabilité de la disponibilité de l'eau et par la fragmentation et la taille réduite des parcelles.

1.4

La cryosphère de montagne dont les glaciers

La cryosphère de montagne compte parmi les éléments du système terrestre les plus sensibles au changement climatique mondial (voir chapitre 2). De fait, elle subit des changements rapides et en grande partie irréversibles en raison du réchauffement climatique prononcé. En différents lieux, l'élévation des températures semble plus rapide en haute qu'en basse altitude, et les conséquences qui en découlent deviennent de plus en plus flagrantes (Pepin et al., 2022). La plupart des glaciers du monde, y compris ceux des montagnes, fondent à une cadence de plus en plus rapide (figure 1.3). Couplé à l'accélération du dégel du pergélisol, à la diminution du manteau neigeux et à des chutes de neige plus irrégulières (Hock et al., 2019 ; Adler et al., 2022), ce phénomène aura des répercussions majeures et irréversibles sur les systèmes hydrologiques locaux, régionaux et mondiaux, dont la disponibilité de l'eau.

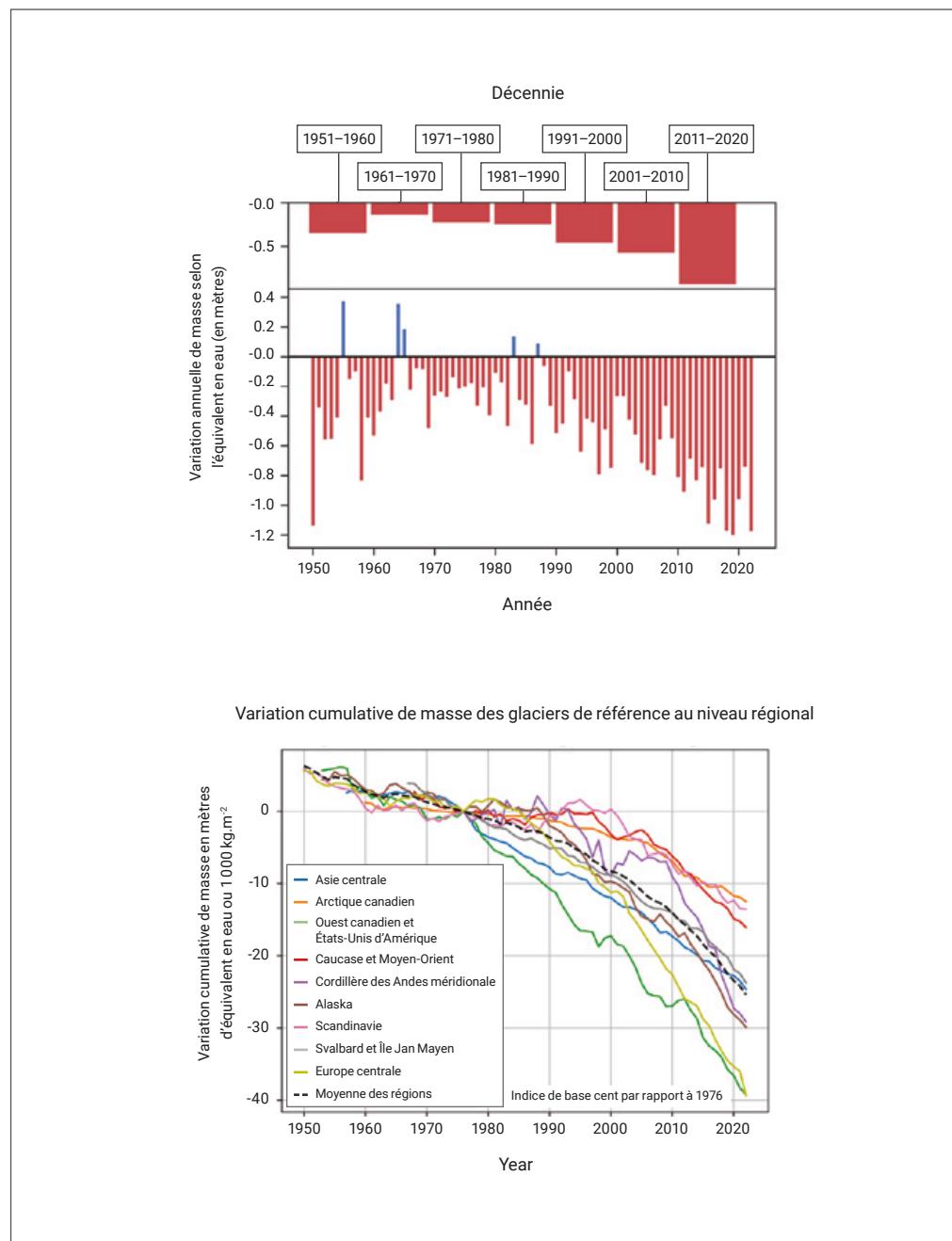
La fonte des neiges fournit la majeure partie des contributions cryosphériques au débit des cours d'eau dans la plupart des bassins fluviaux à composante cryosphérique et apporte souvent un volume d'eau nettement supérieur à celui de la fonte des glaciers. Dans presque toutes les régions montagneuses, le manteau neigeux a diminué, en particulier au printemps et en été, et cette diminution devrait

Figure 1.3

Variation de masse des glaciers dans le monde, 1950-2020

Note : Haut : Variations annuelles et décennales de la masse des glaciers de référence ayant fait l'objet de mesures glaciologiques pendant plus de 30 ans. Bas : Variation cumulée de masse par rapport à 1976 pour les moyennes régionales et mondiales à partir des données des glaciers de référence. Les valeurs des variations de masse annuelles sont indiquées sur l'axe des ordonnées en unités de mètres d'équivalent en eau (m w.e.) qui correspondent à des tonnes par mètre carré (1 000 kg/m²) et sont calculées en tant que moyennes arithmétiques des moyennes régionales.

Source : OMM (2023, figure 14, p. 18, sur la base des données de WGMS (2021)).



s'accentuer au cours des prochaines décennies. L'ampleur et la période de la fonte des neiges ont déjà considérablement changé, et l'on constate que l'équivalent en eau de la neige a évolué de façon majoritairement négative sur l'ensemble de la planète au cours des dernières décennies (Hock et al., 2019).

Sous l'effet du changement climatique, les risques de catastrophes naturelles spécifiques aux montagnes tels les crues soudaines et les coulées de débris, la vidange brutale de lacs glaciaires, les glissements de terrain et les avalanches, ainsi que les dangers qui en découlent pour les sociétés, augmenteront, provoquant des dommages et des perturbations affectant les personnes, les communautés et les infrastructures (Adler et al., 2022).

Références

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Assemblée générale des Nations Unies. 2022a. *Année internationale de la préservation des glaciers (2025)*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 14 décembre 2022. Soixante-dix-septième session, A/RES/77/158. documents.un.org/doc/undoc/gen/n22/756/00/pdf/n2275600.pdf.

—. 2022b. *Développement durable dans les régions montagneuses*. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 14 décembre 2022. Soixante-dix-septième session, A/RES/77/172. documents.un.org/doc/undoc/gen/n22/756/84/pdf/n2275684.pdf.

Ehrlich, D., Melchiorri, M. et Capitani, C. 2021. « Population trends and urbanisation in mountain ranges of the world ». *Land*, vol. 10, n°3, article 255. doi.org/10.3390/land10030255.

Glavovic, B. C., Dawson, R., Chow, W., Garschagen, M., Haasnoot, M., Singh, C. et Thomas, A. 2022. « Cities and settlements by the sea ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2163 à 2194. doi.org/10.1017/9781009325844.019.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. et Steltzer, H. 2019. « High mountain areas ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 131 à 202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M., Price, M. et Ravilious, C. 2000. « Developing a map of the world's mountain forests ». M. Price et N. Butt (éds), *Forests in Sustainable Mountain Development: A State of Knowledge Report for 2000*. Union internationale des instituts de recherche forestière (IUFRO), Série Recherche 5. Wallingford, Royaume-Uni, CABI Publishing, p. 4 à 19. doi.org/10.1079/9780851994468.0004.

Kohler, T., Balsiger, J., Rudaz, G., Debarbieux, B., Pratt, D. J. et Maselli, D. (éds). 2015. *Green Economy and Institutions for Sustainable Mountain Development: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Berne, Centre pour le développement et l'environnement (CDE)/Direction suisse du développement et de la coopération (DDC)/Université de Genève/Geographica Bernensis. boris.unibe.ch/17634/1/Final_Version_Green_Economy_2015%282%29.pdf.

Li, D., Lu, X., Overeem, I., Walling, D. E., Syvitski, J., Kettner, A. J., Bookhagen, B., Zhou, Y. et Zhang, T. 2021. « Exceptional increases in fluvial sediment fluxes in a warmer and wetter High Mountain Asia ». *Science*, vol. 374, n° 6567, p. 599 à 603. doi.org/10.1126/science.abi9649.

OMM (Organisation météorologique mondiale). 2023. *The Global Climate 2011-2020: A Decade of Accelerating Climate Change*. WMO-n° 1338. Genève, OMM. library.wmo.int/records/item/68585-the-global-climate-2011-2020.

Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzaghi, S., Thornton, J. M., Vuille, M. et Adler, C. 2022. « Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world ». *Reviews of Geophysics*, vol. 60, art. e2020RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, G. et Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Vivioli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. et Adler, C. 2022. « Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls ». *PLoS ONE*, vol. 17, n° 7, article e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tremblay, J. C. et Ainslie, P. N. 2021. « Global and country-level estimates of human population at high altitude ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, vol. 118, n° 18, article e2102463118. doi.org/10.1073/pnas.2102463118.

Vivioli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. et Wada, Y. 2020. « Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources ». *Nature Sustainability*, vol. 3, p. 917 à 928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

WGMS (Service de surveillance mondiale des glaciers). 2021. *Global Glacier Change Bulletin No. 4 (2018-2019)*. Zurich, Suisse, WGMS. wgms.ch/downloads/WGMS_GGCB_04.pdf.

Chapitre 2

Modifications de la cryosphère et conséquences sur les ressources en eau

UNESCO-PHI* et OMM*

**Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace et John Pomeroy¹,
James Thornton², Sonam Wangchuk³, James McPhee^{4,5}, Dhiraj Pradhananga⁶,
Kerry Black et Fred Wrona⁷**

**Avec les contributions d'Anil Mishra et Abou Amani (UNESCO-PHI), Nilay Dogulu (OMM),
Tomasz Kolarski (École polytechnique de Gdansk) et Prashant Baral (ICIMOD)**

*Si l'UNESCO-PHI et l'OMM ont coordonné la conception de ce chapitre, ont également participé à sa rédaction :

¹ Université de Saskatchewan, ² Université de Berne, ³ ICIMOD, ⁴ Université du Chili, ⁵ Association internationale des sciences hydrologiques, ⁶ Université Tribhuvan et ⁷ Université de Calgary

• • •

Les hautes montagnes reçoivent de plus grandes quantités de précipitations que les zones de plus basse altitude et génèrent de grandes quantités d'eau de ruissellement et d'écoulement

Au sein des régions montagneuses, de grandes variations d'altitude sont courantes. Dans ce chapitre, « hautes montagnes » désigne des montagnes où la neige et la glace jouent un rôle important dans l'approvisionnement mondial en eau douce (Viviroli et al., 2020 ; GIEC, 2023) comme dans le cycle hydrologique local ou régional. Bien que les deux soient liés, l'hydroclimat – plutôt que l'altitude – constitue une catégorie de base plus pertinente si l'on veut comprendre les modifications à venir de la cryosphère de montagne et leurs conséquences sur les ressources en eau. Souvent considérées comme des « châteaux d'eau », les hautes montagnes reçoivent de plus grandes quantités de précipitations que les zones de plus basse altitude et génèrent de grandes quantités d'eau de ruissellement et d'écoulement (Immerzeel et al., 2020 ; Viviroli et al., 2020). Une grande partie de ces précipitations est composée de chutes de neige stockée sous forme de manteaux neigeux saisonniers et de glace de glacier pendant les périodes froides, puis libérée sous forme d'eau de fonte pendant les périodes plus chaudes.

Il est souvent dit qu'environ 2 milliards de personnes ont besoin des montagnes – et des apports de la fonte de la cryosphère – pour s'approvisionner en eau douce. Ce chiffre découle de l'estimation des 2 milliards de personnes qui vivent dans des bassins hydrographiques qui naissent dans les montagnes (Immerzeel et al., 2020 ; Viviroli et al., 2020). Toutefois, on constate souvent un manque de compréhension et une mauvaise caractérisation de l'importance et des contributions relatives de la fonte des neiges, de la glace et des sols gelés quant à la disponibilité et la qualité des ressources en eau en aval (Gascoin, 2024). Des affirmations telles que « À eux seuls, les glaciers de l'Himalaya fournissent de l'eau à 1,4 milliard de personnes » (Milner et al., 2017, p. 9771) ou « Les glaciers sont essentiels à la vie sur Terre car ils fournissent des ressources en eau vitales à la moitié de l'humanité pour ses usages domestiques, agricoles et hydroélectriques » (UNESCO/UICN, 2022, p. 3) peuvent donner l'impression fausse que, sans ces glaciers, des milliards de personnes seraient privées d'eau (Gascoin, 2024).

Si les glaciers jouent un rôle prépondérant dans la fourniture d'eau douce, ils le font toutefois de façon beaucoup plus nuancée et variable à l'échelle régionale que ne le suggèrent les affirmations ci-dessus. Force est de reconnaître que de nombreux autres processus hydroclimatiques sont à l'œuvre au sein des systèmes de production d'eau douce. Concrètement, dans la plupart des régions de haute montagne, le manteau neigeux saisonnier, et non les glaciers, constitue la principale source de ruissellements (Barnett et al., 2005). Le changement climatique a des effets radicaux sur l'ensemble des composants de la cryosphère de montagne. Il convient, par conséquent, d'examiner clairement les complexités de ces répercussions et de les prendre en considération.

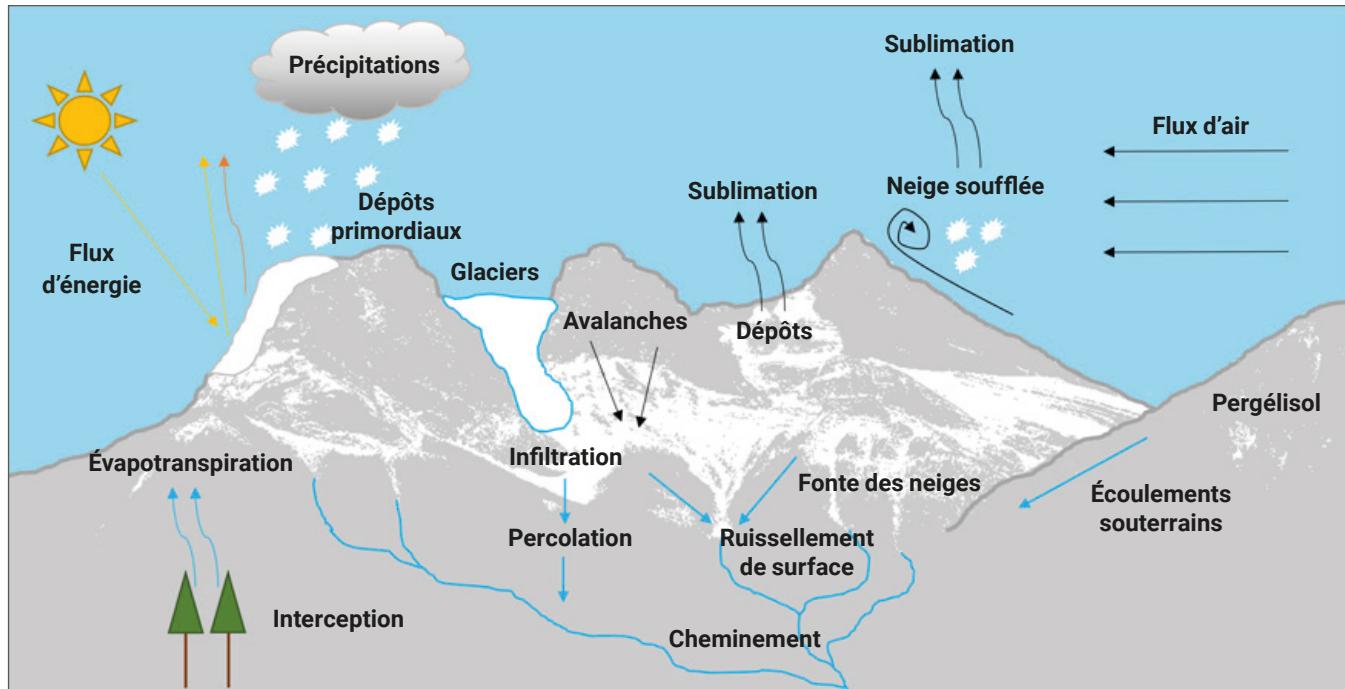
Ce chapitre décrit ce pourquoi les hautes montagnes sont si importantes sur un plan hydrologique et comment évolue actuellement la cryosphère de montagne. En altitudes élevées, le réchauffement climatique est amplifié dans la plupart des cas et entraîne une réduction des accumulations de neige comme de la durée du manteau neigeux, provoquant des pertes de masse et des retraits plus prononcés des glaciers, un dégel du pergélisol (sol gelé en permanence) ainsi qu'une fonte plus précoce et parfois même plus rapide de la neige et de la glace avec de fortes variabilités spatiale et temporelle (Pepin et al., 2022 ; GIEC, 2023). Auparavant prévisibles, les dates de fonte à la saison chaude sont remplacées par une plus grande variabilité des régimes de ruissellement dominés par les précipitations, ce qui entraîne des effets complexes en aval. Les répercussions potentielles de ces changements sur les systèmes d'eau douce et la survenue de phénomènes extrêmes (sécheresses, inondations, glissements de terrain, etc.) sont examinées ci-dessous de même que les répercussions sur les écosystèmes et les communautés en aval.

2.1 Dynamique de la cryosphère de montagne

2.1.1 Les processus hydrologiques de haute montagne

C'est dans les montagnes que se trouve le cours supérieur de nombreux fleuves dans le monde, ce pourquoi ces montagnes jouent un rôle majeur dans le cycle de l'eau sur Terre (figure 2.1). La fonte cyclique des manteaux neigeux et des glaciers au moment de la saison chaude libère de l'eau douce qui s'écoule alors directement dans les cours d'eau et les fleuves ou s'infiltra dans le sol, permettant la reconstitution des nappes phréatiques et l'humidité des sols.

Figure 2.1 Processus hydrologiques et cryosphériques de haute montagne gouvernant les flux d'eau



Source : adapté de Bertoncini (2024, fig. 1.1, p. 5).

Dans de nombreuses régions de haute montagne, la formation d'un manteau neigeux saisonnier fournit la majeure partie des réserves en eau douce. C'est ce que l'on appelle l'« équivalent en eau de la neige » (EEN), soit la quantité d'eau qu'un volume donné de neige produirait s'il fondait (Barnett et al., 2005). Comme illustré par la figure 2.1, les manteaux neigeux situés en montagne peuvent être redistribués sous l'effet du vent qui souffle sur la neige (Pomeroy et Li, 2000), de la gravité qui provoque des avalanches (Bernhardt et Schultz, 2010) et des forêts qui interceptent la neige (Hedstrom et Pomeroy, 1998). La topographie des montagnes favorise l'accumulation des chutes de neige sur les versants situés sous le vent (Lehning et al., 2008). Lorsque la neige est soufflée par le vent ou interceptée, elle subit d'importantes pertes par sublimation⁴ qui peuvent réduire de moitié l'EEN en montagne (Essery et Pomeroy, 2004 ; Pomeroy et al., 2022). La fonte se produit surtout sur les versants exposés au soleil ; elle est plus rapide lors de pluies chaudes et plus lente sous les couverts forestiers. Par conséquent, l'orientation des versants et le couvert forestier conditionnent fortement les pics d'intensité et la durée des hydrogrammes d'écoulement de la fonte des neiges (Marks et al., 1998 ; Ellis et al., 2013). La répartition de l'eau de fonte entre infiltrations et écoulements dépend de la vitesse de fonte, de la texture des sols, de la saturation et de la présence d'un gélisol saisonnier ou permanent. Le gélisol diminue la perméabilité du sol ; toutefois, le réchauffement climatique et l'allongement de la saison sans neige réduisent l'occurrence de ce phénomène.

⁴ Passage direct de l'eau de sa forme solide (neige ou glace) à sa forme gazeuse (vapeur d'eau) sans fonte préalable en eau liquide (USGS, 2019).

• • •

Dans la plupart des régions de haute montagne, le manteau neigeux saisonnier, et non les glaciers, constitue la principale source de ruissellements

Du fait des processus de redistribution, la quantité de neige fondu est fonction des changements de végétation. Dans la toundra, la prolifération des arbustes peut réduire la redistribution et la sublimation de la neige, augmentant ainsi l'EEN. À l'inverse, le reboisement augmente les pertes par sublimation, ce qui a pour effet de réduire l'EEN. Le changement climatique a un impact particulièrement marqué sur la fonte des neiges, car il peut augmenter ou diminuer les précipitations en montagne et accroître la température et l'humidité de l'air, et de fait réduire la part des précipitations tombant sous forme de neige, avancer la période de fonte de la neige, induire des changements dans les épisodes de fonte de type pluie sur neige et accélérer ou ralentir le rythme de fonte de la neige. En règle générale, la vitesse de fonte diminue avec l'augmentation du couvert végétal.

Si les conditions climatiques le permettent, toute la neige ne fendra pas. En persistant pendant de nombreuses années, les manteaux neigeux pérennes peuvent devenir de la glace de glacier (DeBeer et al., 2020). L'accumulation saisonnière de neige et sa compression progressive en névés⁵ puis en glace contribuent à l'accroissement de masse d'un glacier tandis que l'ablation⁶ qui se produit lors de la saison chaude contribue à sa diminution. Le bilan de masse du glacier est la différence, en unités de mesure, entre l'accumulation de neige et l'ablation de neige et de glace. L'ablation par fonte et sublimation varie fortement selon la durée du manteau neigeux, le rayonnement absolu et la température. Ces facteurs dépendent à leur tour de la température de l'air, de la couverture nuageuse, de l'albédo de la surface glacée, des chutes de neige hivernales et de la redistribution de la neige, ce qui les rend sensibles au changement climatique.

Du fait de tempêtes de poussière, d'une pollution atmosphérique et d'incendies de forêt plus fréquents et plus intenses, la poussière, les dépôts de suie de combustion, notamment les dépôts de carbone noir, de même que la prolifération microbienne et algale à la surface de la neige et des glaciers sont de plus en plus fréquents (encadré 2.1). Ces phénomènes peuvent accélérer les vitesses de fonte en réduisant l'albédo de la surface jusqu'aux prochaines chutes de neige (Aubry-Wake et al., 2022). Toutefois, si la couverture de débris rocheux est suffisante, il arrive qu'une masse de glace soit préservée du réchauffement externe et persiste longtemps après le retrait du restant d'un glacier (Miles et al., 2020).

Les milieux montagneux glaciaires présentent une hydrologie complexe. La présence de glaciers accentue l'accumulation de neige et les vents de drainage froids, réduit la température des cours d'eau et retarde la formation de ceux-ci. Bien que ces processus soient souvent mal compris, on peut déjà indiquer que les voies sous-glaciaires guident les eaux de fonte à travers divers terrains, y compris les lits rocheux et les moraines, et permettent la recharge des nappes phréatiques (Müller et al., 2022). La figure 2.2 schématise certains changements attendus au sein des milieux de haute montagne en raison du réchauffement atmosphérique.

2.1.2 Évolutions de la cryosphère de montagne

Les preuves d'un réchauffement atmosphérique depuis le début du XX^e siècle sont partout présentes au sein des chaînes de montagnes. Les effets en sont amplifiés aux altitudes plus élevées dans certaines régions (Initiative pour la recherche sur la montagne, groupe de travail sur l'EDW, 2015 ; Hock et al., 2019a ; Pepin et al., 2022). Le réchauffement augmente l'altitude à laquelle les précipitations se transforment en chutes de neige. De fait, les régions de plus basse altitude et aux climats plus chauds sont confrontées à une diminution plus importante de l'épaisseur et de la durée de l'enneigement tandis qu'aux altitudes plus élevées et plus froides peut se produire une augmentation des pics d'EEN, là où les précipitations augmentent et les pertes par sublimation diminuent en raison du changement climatique (López-Moreno et al., 2020).

⁵ Une étape intermédiaire dans la transformation de la neige en glace de glacier (USGS, 2013).

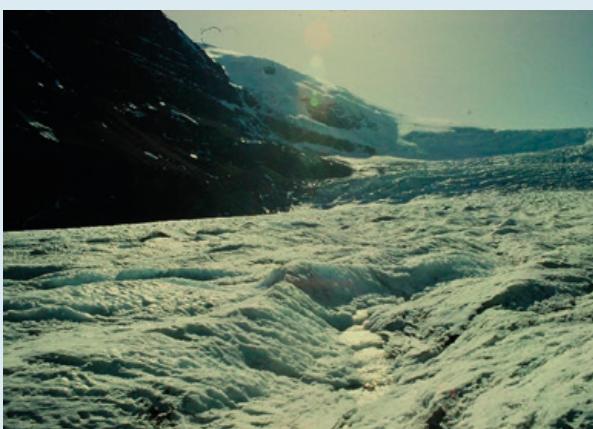
⁶ Perte de neige et de glace d'un glacier (par fonte, évaporation, sublimation ou vélage par exemple) (USGS, 2013).

Encadré 2.1 Effets du carbone noir, de la poussière et d'autres particules sur la fonte des neiges et des glaces

Avec le réchauffement du climat, les régions montagneuses du monde entier reçoivent les émissions d'un nombre croissant d'incendies forestiers et de tempêtes de poussière. Associées aux activités anthropiques, ces émissions augmentent les dépôts de carbone noir et d'autres types de particules à la surface des glaciers et des manteaux neigeux pérennes. De telles particules peuvent être transportées sur de grandes distances, y compris d'un continent à l'autre. Les impuretés assombrissent les surfaces neigeuses et glacées, ce qui accroît l'absorption des rayons solaires. De plus, elles peuvent favoriser la croissance microbienne qui peut encore assombrir la surface et prolonger la présence des impuretés sur de longues périodes. Cela peut avoir des répercussions significatives sur le bilan énergétique de la surface et accroître les taux de fonte, en particulier pendant les périodes et aux endroits où le rayonnement solaire entrant s'avère élevé. On reconnaît d'ailleurs de plus en plus l'importance et l'influence de ce facteur (Zhang et al., 2021 ; Bertoncini et al., 2022).

Du fait de certaines complexités et de processus interdépendants, les effets des dépôts de particules ne se résument pas à un accroissement des taux de fonte. Les dépôts varient en ampleur, pouvant avoir une étendue locale jusqu'à régionale, avec des variations spatiales considérables. Il arrive que les effets soient de courte durée lorsque les chutes de neige ultérieures recouvrent la surface et rafraîchissent l'albédo, ou lorsque l'avènement de fontes ou de pluies lavent les surfaces glacées. Dans certains endroits, il peut cependant se produire une rétroaction positive lorsque les impuretés sont concentrées par la fonte, assombrissant davantage la surface, ce qui renforce encore la fonte. La fumée des incendies de forêt peut également réduire le rayonnement solaire, au point même de provoquer un refroidissement de la surface, contrebalaçant dès lors les effets d'une réduction de l'albédo (Aubry-Wake et al., 2022).

Le dépôt de carbone noir et d'autres particules sur les surfaces enneigées et glacées peut avoir des répercussions importantes sur le bilan énergétique et la fonte de la surface. Quelle est l'évolution de ce phénomène, quelle est la durée de ses effets, quelles rétroactions et interactions génère-t-il, quelle est sa variabilité à l'échelle mondiale, voici des questions qui demeurent en suspens et qu'il convient, par conséquent, d'élucider si l'on veut être en mesure de prévoir ce que seront les ressources en eau des régions montagneuses à l'avenir.



Glacier d'Athabasca au Canada sans suie, octobre 1993

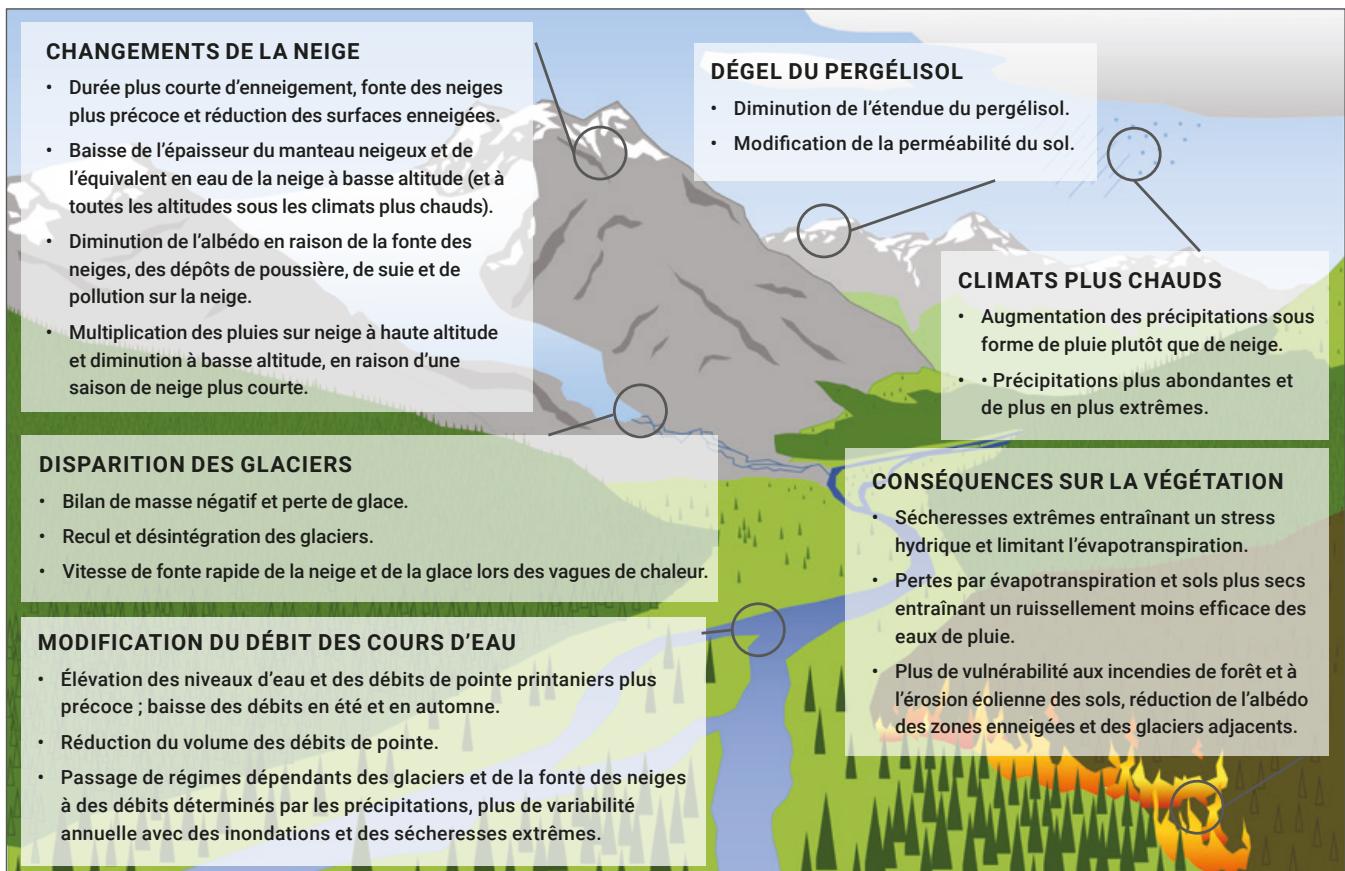
Photographie : John Pomeroy.



La suie des feux de forêt et les algues assombrissent le glacier Athabasca, août 2019

Photographie : John Pomeroy.

Figure 2.2 Principaux changements cryosphériques et hydrologiques causés par le réchauffement climatique dans les régions de haute montagne au XXI^e siècle



Source : auteurs.

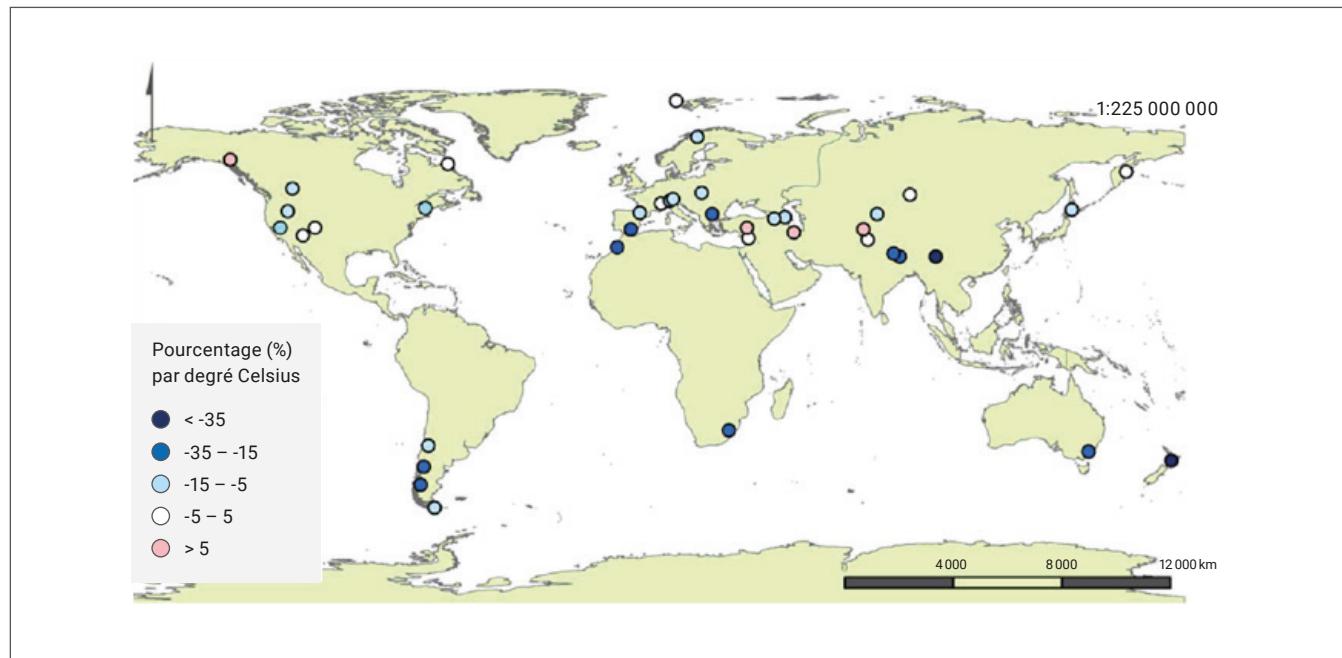
• • •
Les preuves d'un réchauffement atmosphérique depuis le début du XX^e siècle sont partout présentes au sein des chaînes de montagnes

Parmi les évolutions observées au sein des bassins montagneux, on note une plus grande proportion de précipitations tombant sous forme de pluie plutôt que de neige, une réduction de la redistribution de la neige et de la surface enneigée ainsi qu'une fonte des neiges plus précoce (figure 2.2). Il en résulte un découplage du régime de production des cours d'eau et du régime de la fonte des neiges, avec une réduction rapide de l'effet « digue de neige » sur la crue printanière⁷, ce qui laisse les cours d'eau seuls répondre rapidement aux précipitations hivernales et aux événements de fonte associés (López-Moreno et al., 2020).

Avec le réchauffement, nous assistons à une diminution plus rapide des accumulations de neige et des pics d'EEN que l'augmentation des taux de fonte (Pomeroy et al., 2022). La diminution de l'EEN avec le réchauffement s'avère plus importante sur les versants exposés au soleil, les zones non boisées et les altitudes basses tandis que l'augmentation des taux de fonte due au réchauffement est plus forte aux basses altitudes et sous les climats plus chauds. On s'attend à ce que les phénomènes de pluie sur neige diminuent avec le réchauffement dans la plupart des bassins de haute montagne, les diminutions les plus importantes ayant lieu aux altitudes les plus basses et sous les climats plus chauds, tandis que des augmentations des pluies sur neige devraient avoir lieu à haute altitude et sous des climats plus froids (figure 2.3 ; López-Moreno et al., 2021). Du fait de l'accroissement du réchauffement climatique, la diminution des accumulations de neige et la fonte précoce des neiges, y compris la multiplication des fontes en plein hiver, entraîneront un déclin du volume des crues ainsi que des débits de pointe en avance de plusieurs semaines voire de plusieurs mois (López-Moreno et al., 2020).

⁷ Pic dans le débit d'un cours d'eau résultant de la fonte des neiges au printemps.

Figure 2.3 Modification, en pourcentage, de la fréquence des pluies sur neige en haute montagne dans le monde pour 1^o C de réchauffement, 1982-2014



Note : les points roses correspondent aux montagnes présentant la plus forte augmentation de la fréquence des pluies sur neige avec le réchauffement climatique et les points noirs, la plus forte diminution.

Source : López-Moreno et al. (2021, fig. 6, p. 7). Licence CC BY 4.0.

Les régions montagneuses où les accumulations de neige pendant la saison chaude ne persistent plus verront inévitablement leurs glaciers disparaître étant donné que des accumulations pérennes sont nécessaires pour maintenir les glaciers. Depuis le XX^e siècle, le recul et la disparition des glaciers se poursuivent dans la plupart des régions du monde (DeBeer et al., 2020 ; GIEC, 2023) et se sont même accélérés au cours des dernières décennies (Zemp et al., 2019). Partout dans le monde, la plupart des glaciers de montagne s'amincissent rapidement (figure 2.4 ; Hugonnet et al., 2021) et sont en déséquilibre par rapport aux conditions climatiques actuelles. Autrement dit, leur diminution se poursuivra même si les émissions de gaz à effet de serre diminuent (Cook et al., 2023). L'accroissement du réchauffement atmosphérique agravera le déséquilibre à l'échelle mondiale : si le réchauffement planétaire est entre 1,5 °C et 4 °C, les glaciers de montagne perdront entre 26 % et 41 % de leur masse totale par rapport à 2015 d'ici à 2100. Un grand nombre de glaciers particuliers vont ainsi complètement disparaître, provoquant un dégel du cours supérieur de nombreuses rivières situé en montagne (Rounce et al., 2023).

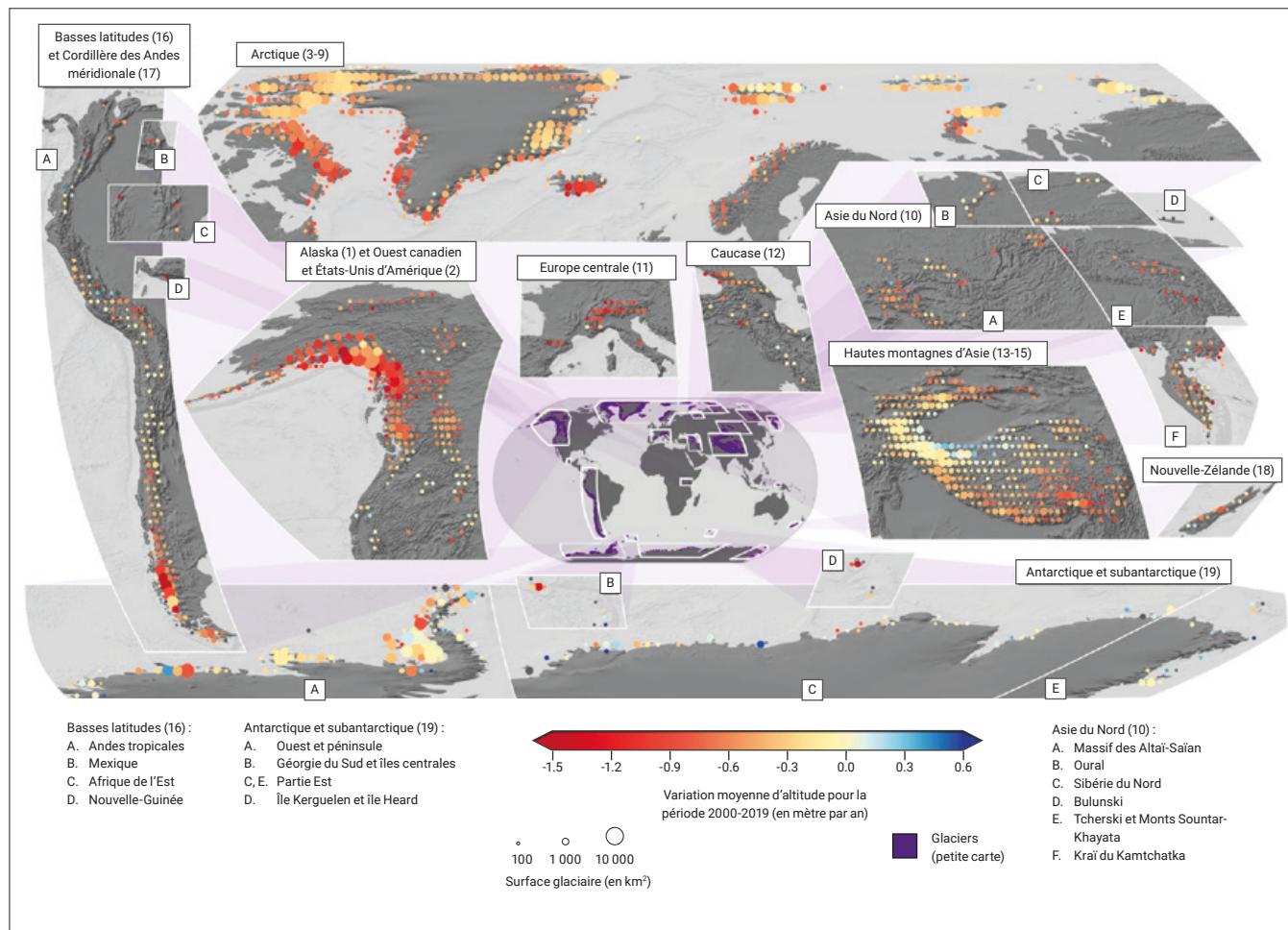
2.2

Répercussions de l'évolution des conditions d'enneigement et de glace en montagne

2.2.1 En ce qui concerne l'eau douce

Les différentes contributions des éléments de la cryosphère (comme la neige, la glace de glacier et le pergélisol) aux réserves d'eau douce varient en fonction de la région, de la topographie, de l'année et de la saison. Les répercussions des changements cryosphériques dépendront de la manière dont les systèmes en aval – humains et naturels – réagissent à l'émergence des eaux de surface et aux réserves d'eaux souterraines, y compris la quantité, le moment, la durée et la fiabilité du débit des cours d'eau. La perte de synchronisation entre les ruissellements provenant des montagnes et la demande en aval constitue un motif d'inquiétude pour les usagers de l'eau. Les régions où l'usage de l'eau a toujours coïncidé avec la fonte des neiges et des glaciers pendant la saison chaude s'avèrent les plus vulnérables au changement. Il convient donc de prendre en compte les différences locales lors de l'élaboration de politiques d'atténuation et d'adaptation.

Figure 2.4 Changements d'altitude de la surface des glaciers dans le monde, 2000-2019



Note : partout dans le monde, on constate la diminution du niveau de la surface des glaciers et la perte de glace dans les régions montagneuses tandis que des augmentations ne sont observées que dans quelques zones limitées.

Source : Hugonnet et al. (2021, fig. 2, p. 727). Cette figure est reproduite avec l'autorisation du SNCSC (Springer Nature Customer Service Support) ; la licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) ne s'applique pas à cette figure.

Les contributions de la fonte des glaciers aux réserves en eau disponibles varie en importance. Par exemple, Buytaert et al. (2017) ont constaté que dans les Andes tropicales, la fonte des glaciers n'apporte que 2,2 % de l'eau disponible au cours d'une année normale à Quito, en Équateur. En revanche, plus au sud, à La Paz (État plurinational de Bolivie), ils ont établi que la fonte des glaciers apporte 15 % des réserves annuelles d'eau et 19 % à Huaraz, au Pérou. Par ailleurs, dans le bassin de la rivière Bow au Canada (où vivent 2 millions de personnes), la fonte des neiges plutôt que la fonte des glaciers constitue un apport beaucoup plus important pour le volume annuel des cours d'eau – puisqu'elle représente 60 à 80 % du débit disponible (Fang et Pomeroy, 2023). Parce qu'ils contribuent de façon majeure à l'approvisionnement en eau douce, les régimes nivologiques des montagnes – et plus particulièrement leur évolution – devraient constituer un domaine de recherche prioritaire.

Même si l'on surestime souvent leur importance pour l'approvisionnement en eau douce, les glaciers offrent néanmoins toute une gamme de bénéfices essentiels à la sûreté de l'eau, (encadré 2.2). Leur effet tampon contre la sécheresse (soit une plus grande fonte des glaciers pendant les périodes chaudes et sèches qui peut compenser un manque d'eau douce) peut renforcer la résilience en aval lors des périodes de stress hydrique. Les glaciers fondent plus vite aux moments les plus chauds et les plus secs, et lorsque le manteau neigeux des montagnes a été épousé, cette rapidité de fonte peut jouer un rôle fondamental dans le maintien du débit des cours d'eau jusqu'à la fin de la période de sécheresse (Hopkinson et Young, 1998).

• • •

L'effet tampon de la fonte des glaciers contre la sécheresse peut s'avérer essentiel au maintien de la production agricole

Dans les régions où la saison sèche coïncide avec la saison de croissance des plantes, l'effet tampon de la fonte des glaciers contre la sécheresse peut s'avérer essentiel au maintien de la production agricole. Buytaert et al. (2017) ont constaté que dans les Andes tropicales, la superficie maximale mensuelle des terres irriguées pour au moins 25 % de l'eau d'irrigation par la fonte des glaciers a doublé lors des années de sécheresse. Pour certaines communautés de haute montagne dont la production alimentaire et d'autres fonctionnements cruciaux dépendent de l'eau provenant des apports glaciaires, le recul des glaciers peut obliger à modifier des pratiques ancestrales (voir encadré 3.4) ou accroître leur dépendance vis-à-vis de ressources en eau de surface et en eaux souterraines de plus en plus incertaines. Avec le recul et la disparition des glaciers de montagne, les régions de haute montagne perdront leurs précieuses capacités tampon et les régions situées en aval risquent d'avoir moins de résilience face aux conditions climatiques les plus sèches ou arides (Fang et Pomeroy, 2023).

Plus l'on se trouve en aval des glaciers, plus leur contribution à l'approvisionnement en eau douce diminue. Les exemples fournis par la figure 2.5 (Kaser et al., 2010) montrent que l'impact de l'hydrologie des glaciers sur le débit des rivières en aval diminue avec la distance aux glaciers et qu'au niveau de l'embouchure des rivières, cette contribution est négligeable. Les communautés les plus proches des bords des glaciers seront donc les plus vulnérables au recul de ceux-ci, même si les avantages apportés en termes de résilience contre la sécheresse, y compris pour les communautés installées loin en aval dont les ressources en eau ne dépendent pas majoritairement des glaciers, demeurent réels. Malgré l'incompréhension qui les entoure, les eaux souterraines de montagne et les effets du dégel du pergélisol sur les débits de base devraient gagner en importance avec la disparition progressive des glaciers en recul (Arenson et al., 2022 ; van Tiel et al., 2024).

Encadré 2.2 Mise en garde contre l'application du concept de « pic d'eau » lors de la gestion des ressources en eau

Le concept de pic d'eau est couramment utilisé pour discuter des répercussions de la récession glaciaire. Il implique qu'il se produise, du fait de l'augmentation des taux de fonte et de la diminution des superficies des glaciers, une première augmentation des volumes d'écoulement glaciaire liée aux taux de fonte jusqu'à un « pic » suivie d'un déclin dû à une couverture glaciaire moindre (Huss et Hock, 2018 ; Hock et al., 2019b).

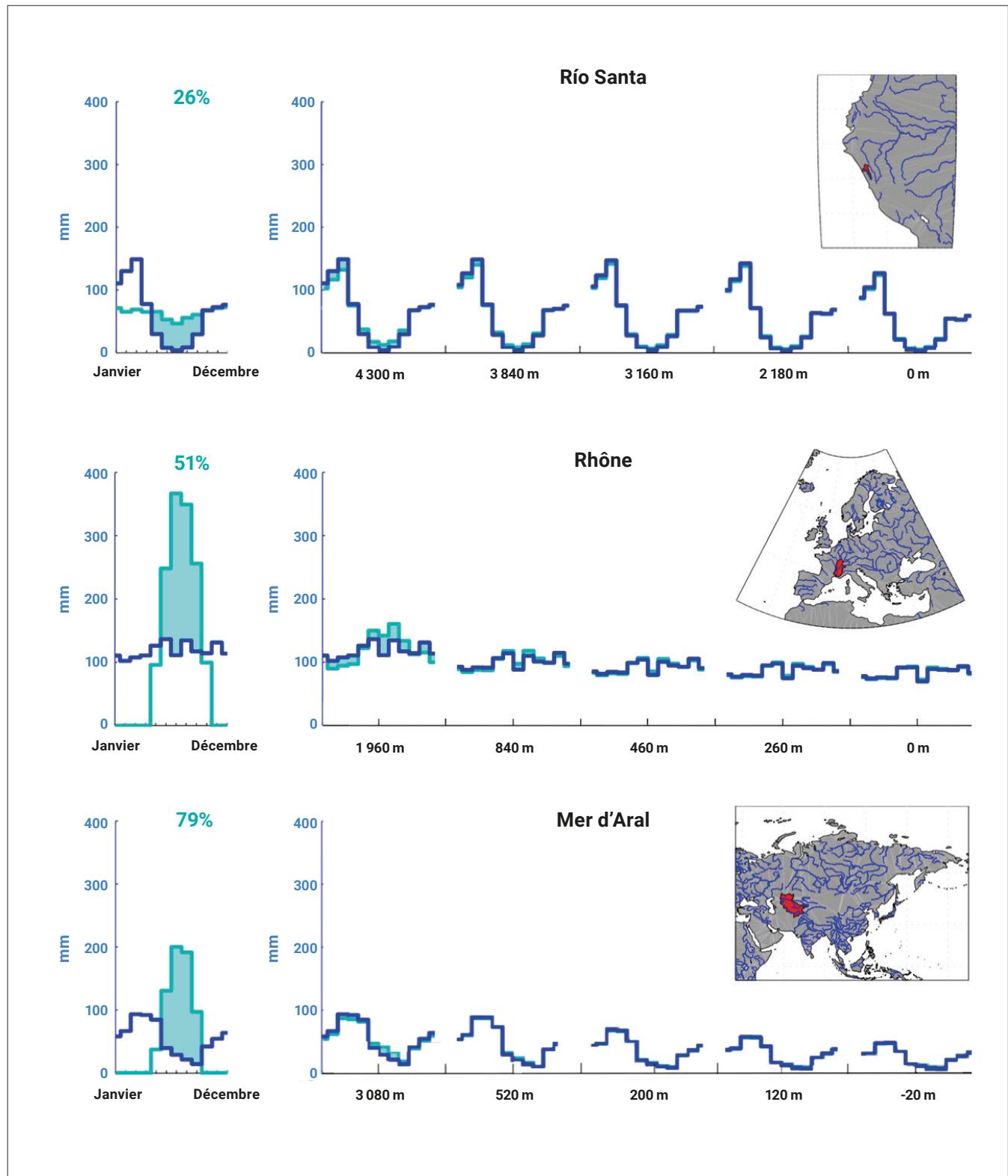
Il s'agit d'un concept idéalisé qui ne devrait s'appliquer qu'à la fonte des glaciers, pouvant ne pas être pertinent pour les débits de toutes les sources d'eau de montagne. La plupart des cours d'eau des bassins glaciaires ne sont pas uniquement alimentés par les glaciers, et il convient par conséquent de prendre en compte d'autres changements hydrologiques dans les prévisions de débit (tels que les changements des régimes de précipitation, l'évolution du manteau neigeux, l'évolution de la végétation et les interactions avec les eaux souterraines).

Par exemple, une augmentation des précipitations de montagne est prévue dans de nombreuses régions du monde. Il serait peu probable que les débits de tous les cours d'eau correspondent à un pic de fonte glaciaire puis tendent à la baisse étant donné que la plupart de ces débits sont aussi affectés par la fonte des neiges et le ruissellement des précipitations. Partout dans le monde, les glaciers reculent. La plupart de leurs apports saisonniers en eau ont augmenté mais déclineront. Pour ce qui est de la gestion des ressources en eau, le pic d'eau idéal décroît au fur et à mesure que la taille du bassin augmente et que son débit sortant se trouve de plus en plus en aval des glaciers.

Il convient également de souligner que si l'on peut qualifier les hautes montagnes de « châteaux d'eau », la manière dont les communautés en aval dépendent des glaciers pour s'approvisionner en eau est souvent mal décrite (Viviroli et al., 2020). On prétend souvent que les glaciers sont essentiels à la constitution des ressources en eau mondiales (on peut lire que les « glaciers de l'Himalaya fournissent à eux seuls de l'eau à 1,4 milliard de personnes » [Milner et al., 2017, p. 9771]), et donne au public l'impression inexacte que la moitié de l'humanité serait privée d'eau sans les glaciers (Gascoin, 2024).

La cryosphère de montagne (dont les glaciers) joue un rôle essentiel dans l'apport d'eau douce ; cependant, la contribution relative des glaciers, de la neige et de la glace pour la constitution de ressources en eau douce s'avère très variable selon l'époque et la géographie. Les gestionnaires de l'eau et les décideurs politiques devraient se méfier de ce « sensationalisme des glaciers » et voir de quelles manières leurs situations locales diffèrent des messages diffusés à l'échelle mondiale.

Figure 2.5 Contributions de la fonte des glaciers et des précipitations au débit des cours d'eau dans des exemples de grands bassins disposant de sources en montagne



Note : À gauche : bilan de masse des zones de glaciers (neige + glace) avec l'accumulation mensuelle (bleu foncé), l'ablation mensuelle (turquoise) et le volume des ruissellements de fonte de la neige et de la glace du glacier (ombrage turquoise). Les pourcentages indiquent les précipitations annuelles sur le glacier qui s'écoulent sous forme d'eau de fonte plus tard dans la saison. À droite : effet du ruissellement saisonnier différé de la neige et de la glace sur le débit de la rivière en fonction de l'altitude (axe des abscisses), en commençant par l'extrémité finale du glacier et en terminant à l'exutoire de la rivière, avec les précipitations annuelles (bleu foncé) et la fonte de la neige et de la glace du glacier (turquoise).

Source : adapté de Kaser et al. (2010, fig. 1, p. 20224). La licence Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) ne s'applique pas à cette figure. Le PNAS n'est pas responsable de l'exactitude de cette traduction.

2.2.2 Réactions des écosystèmes

Les changements provoqués par le climat au sein de la cryosphère de montagne transforment les régimes hydrologiques et la qualité de l'eau. La neige et la glace sont des habitats pour de nombreuses espèces ainsi que des écosystèmes actifs sur le plan biologique (Jones et al., 2001). Elles jouent un rôle essentiel dans le cycle bio-géochimique du carbone, de l'azote et d'autres éléments (Sharp et Tranter, 2017). Dans les environnements de haute montagne, les réponses écologiques à un climat plus enneigé et plus pluvieux se traduiront notamment par une plus grande disponibilité d'eau liquide près de la surface tout au long de l'année, la pousse d'arbres et d'arbustes à des altitudes plus élevées, une mobilité accrue des nutriments et des contaminants, une plus forte croissance d'algues et d'autres micro-organismes ainsi qu'une production accrue de carbone organique (Rasouli et al., 2019 ; Verrall et Pickering, 2020).

Des effets rétroactifs entre les feux de forêt, les tempêtes de poussière et les algues croissant sur les glaciers ont été observés, les nutriments présents dans les dépôts de carbone créant des habitats fertiles pour les algues qui accélèrent la fonte en diminuant l'albédo des glaciers et de la neige (Williamson et al., 2019 ; Aubry-Wake et al., 2022). La qualité de l'eau dans les régions montagneuses constitue également un sujet de préoccupation. Certaines études suggèrent que la dégradation du pergélisol dans les régions montagneuses qui reposent sur des roches mères contenant des sulfures pouvait faciliter l'oxydation des minéraux sulfurés jusqu'alors inhibée, entraînant ainsi de plus fortes concentrations de métaux lourds dans les réserves d'eaux souterraines (Ilyashuk et al., 2018) (voir chapitre 6).

• • •

La déglaciation devrait avoir des conséquences énormes sur les réseaux alimentaires aquatiques

Les répercussions hydro-écologiques s'étendent en aval, aux environnements fluviaux, lacustres et marins proches du rivage. Parmi elles, on trouve des modifications des régimes sédimentaires et thermiques, des changements dans les flux bio-géochimiques et de contaminants, des perturbations de la disponibilité et la qualité des habitats ainsi des variations dans la distribution de la diversité des espèces (Milner et al., 2017 ; Somers et McKenzie, 2020). Vanderwall et al. (2024) ont établi que les lacs dépendant des glaciers possèdent des caractéristiques bio-géochimiques distinctes de celles des lacs de montagne alimentés par la neige. La déglaciation devrait avoir des conséquences énormes sur les réseaux alimentaires aquatiques, les répercussions sur les lacs et les cours d'eau alimentés par les glaciers étant les plus significatives.

Les glaciers jouent un rôle thermorégulateur important pour les habitats d'eau douce et les habitats marins littoraux, étant donné que leur eau de fonte comme les eaux souterraines émanant des glaciers rocheux contribuent à maintenir des températures constantes et fraîches, essentielles à certaines espèces de poissons (Harrington et al., 2017 ; Somers et McKenzie, 2020). Il a été constaté que les altérations du ruissellement glaciaire de montagne et des courbes de température ont des effets positifs et négatifs sur la survie des espèces de poissons anadromes tel le saumon (O'Neel et al., 2015). Dans les écosystèmes côtiers de l'Alaska, une part importante des variations de quantité d'algues pélagiques littorales comme de quantité et de distribution du zooplancton, des poissons et des oiseaux de mer s'avère liée aux changements d'apport d'eau douce glaciaire, notamment en termes de température et de turbidité (Arimitsu et al., 2016). Dans les régions arides de haute montagne, les glaciers sont parfois la principale source d'eau douce des zones humides (Azócar et Brenning, 2010 ; Schaffer et al., 2019).

2.2.3 Les risques

Les conséquences du changement climatique, notamment la hausse des températures, le recul des glaciers, le dégel du pergélisol et la modification des régimes de précipitations, influent sur les risques d'inondation et de glissement de terrain (Carrivick et Tweed, 2016 ; Chiarle et al., 2021). Les phénomènes associés à ces risques, telles les coulées de débris et

les crues, les avalanches, les chutes de pierres et de glace, les inondations dues à la vidange brutale de lacs glaciaires⁸, sont désignés communément sous le nom de « géorisques ». Ils peuvent représenter des menaces importantes tant pour les communautés, la faune et la flore que pour les infrastructures des régions montagneuses (Chiarle et al., 2021). En dépit du caractère parfois isolé de ces événements, il est possible d'assister à des effets en cascade (par lesquels un processus en déclenche un autre) de même qu'à des effets de rétroaction entre ceux-ci (encadré 2.3 ; Chiarle et al., 2021).

Les régions montagneuses du monde entier sont exposées aux géorisques. En Inde, en 2023, une vidange brutale de lac glaciaire a provoqué une montée rapide des eaux jusqu'à une hauteur de 5 à 6 m le long de la rivière Tista. Trente personnes au moins en sont mortes et un barrage hydroélectrique a été détruit (CESAP, 2023). Dans les Andes au centre du Chili, la déglaciation a probablement joué un rôle clé dans le glissement de terrain du ruisseau Parraguirre. En 1987, celui-ci s'est transformé en une coulée de débris qui a parcouru 57 km, tuant 37 personnes et causant des dommages considérables aux infrastructures (Sepúlveda et al., 2023).

Encadré 2.3 Rétroactions entre privations de neige, incendies de forêt et coulées de débris

Les géorisques peuvent être exacerbés par les rétroactions entre la fonte des neiges et de la glace, leurs impacts hydrologiques en aval et le surgissement de feux de forêt. Les périodes d'incendies de forêt graves commencent généralement par des privations de neige dues à la fonte précoce de masses de neige disposant d'un faible EEN en raison d'hivers chauds et secs et d'une chaleur printanière exceptionnelle (Westerling et al., 2006). L'incendie des forêts de montagne peut réduire les capacités d'interception des précipitations et chutes de neige, la capacité de stockage de l'humidité dans le sol car les sols organiques ont brûlé ainsi que la capacité d'infiltration, ce qui accroît les risques de ruissellement de neige fondu et d'inondations causées par les pluies sur la neige.

Le risque de coulées de débris et de glissements de terrain est également susceptible d'augmenter étant donné que les cendres et les sols brûlés peuvent accroître la profondeur de terrain meuble et mobile. Combinés à une végétation morte ou en décomposition, ces facteurs peuvent contribuer à l'entraînement d'importants volumes de débris lors d'inondations ou de glissements de terrain (Jakob et al., 2022 ; Vahedifard et al., 2024).

Le changement climatique peut accentuer la vulnérabilité d'une pente aux géorisques qui peuvent se produire lors de précipitations extrêmes et de vagues de chaleur.

Les géorisques ont des conséquences sur la santé et la sécurité humaines, l'habitat de la faune et de la flore, la résistance des infrastructures et les industries du tourisme. Les glissements de terrain et les avalanches sont susceptibles de bloquer et d'endommager les infrastructures de transport et de dévaster les établissements et les activités humaines (Carey et al., 2012 ; 2021). Les inondations survenant dans les environnements montagneux s'avèrent tout aussi préoccupantes, en particulier dans le cas des épisodes de pluie sur la neige et de vidanges brutales de lacs glaciaires. L'entraînement de débris et les courants torrentiels peuvent causer des dommages similaires en fonction de la taille, de l'intensité et de l'origine de l'inondation (Haeberli et al., 2017 ; Clague et O'Connor, 2021). Ces géorisques peuvent également affecter le tourisme de montagne, les activités d'alpinisme et les capacités d'intervention d'urgence, car les événements qu'ils provoquent peuvent endommager les infrastructures d'accès, détruire des sites, des itinéraires et des paysages prisés (Hanly et McDowell, 2024) et décourager les visiteurs (Wedgwood, 2014).

⁸ Inondations soudaines et catastrophiques causées par la rupture de barrages naturels – généralement formés par des moraines glaciaires ou de la glace – à l'intérieur desquels se trouvent les lacs glaciaires. Ces ruptures se produisent lorsque la pression de l'eau augmente derrière le barrage, conduisant à son effondrement causé par l'érosion, l'activité sismique ou l'afflux soudain d'eau de fonte.

Les géorisques ont un coût pour les personnes, affectant les moyens de subsistance, les infrastructures et les économies. À elles seules, les vidanges brutales de lacs glaciaires ont fait plus de 12 000 morts au cours des deux derniers siècles et ont gravement endommagé des terres agricoles, des habitations, des ponts, des routes, des centrales hydroélectriques et des biens culturels, provoquant souvent des déplacements internes (Shrestha et al., 2010 ; Carrivick et Tweed, 2016). Sous l'effet du recul des glaciers, le nombre et la superficie des lacs glaciaires ont augmenté de manière significative depuis les années 1990. Davantage de lacs de ce type verront le jour au cours des prochaines décennies, ce qui créera de nouvelles zones sensibles exposées aux dangers d'inondations provoquées par les vidanges brutales de ces lacs (Adler et al., 2022). De même que pour de nombreux géorisques, les dommages s'avèrent souvent plus importants dans les pays à revenu faible ou intermédiaire (encadré 2.4) que dans les pays à revenu élevé (Carrivick et Tweed, 2016).

Stäubli et al. (2018) ont calculé les pertes économiques provoquées par 713 incidents survenus entre 1985 et 2014 dans les régions montagneuses. Bien qu'elles ne concernaient pas seulement les géorisques cryosphériques, elles ont dépassé, en valeur absolue, 56 milliards de dollars EU, touché plus de 258 millions de personnes et entraîné plus de 39 000 décès. L'augmentation de la population et de l'urbanisation au sein des régions montagneuses tend également à accroître l'exposition des personnes et des biens aux géorisques ainsi qu'aux pertes et dommages qui leur sont associés (Thornton et al., 2022).

Encadré 2.4 Gestion des vidanges brutales de lacs glaciaires au Pérou

Au Pérou, les communautés de la cordillère Blanche ont depuis longtemps appris à gérer les vidanges brutales de lacs glaciaires. Les éboulements, les glissements de terrain et le vêlage des glaciers dans les plans d'eau ont été à l'origine d'événements dévastateurs à la suite desquels ont été déployés d'importants projets d'ingénierie destinés à atténuer les effets de ces vidanges, notamment en abaissant les niveaux des lacs et en renforçant les barrages de moraine en vue de prévenir l'érosion et les ruptures.

À travers les Andes, on trouve aujourd'hui des tuyaux et des tunnels de drainage, des barrages artificiels et des systèmes d'alerte précoce dans de nombreux lacs (Mergili et al., 2020). Il s'agit notamment des conduites de drainage qui partent du lac Palcacocha qui, en 1941, a subi une vidange brutale ayant causé la mort d'environ 1 600 personnes (Emmer, 2017 ; Carey et al., 2021).

Pour les populations vulnérables, les conséquences des évolutions de la cryosphère sont amplifiées (ICIMOD, 2022). Les impacts humains de ces changements sur les peuples autochtones et les communautés locales des régions montagneuses s'avèrent profonds. Ils incluent la réduction des capacités d'approvisionnement en nourriture, la dégradation des pâturages, la perte d'enneigement importants sur un plan culturel et la détérioration de sources d'eau essentielles (figure 2.6) (Caretta et al., 2022). Au sein de ces communautés, les femmes sont particulièrement vulnérables car elles assument souvent des responsabilités disproportionnées en matière d'alimentation et d'eau (ICIMOD, 2022).

Figure 2.6 Répercussions des changements climatiques, hydrologiques et cryosphériques sur les peuples autochtones et les communautés locales des régions froides



Source : Caretta et al. (2022, fig. 4,6, p. 572).

2.3 Les défis en matière de gestion de l'eau

Les systèmes hydrologiques sous l'influence de la cryosphère de montagne s'étendent bien au-delà des vallées montagneuses. Les modifications de l'enneigement et de la glaciation peuvent affecter les communautés en aval qui ne s'identifient pas nécessairement aux montagnes. Il est donc important de susciter une prise de conscience quant à la cryosphère et son rôle dans le cycle de l'eau sur Terre, en particulier parmi les gestionnaires de l'eau et autres décideurs politiques. La gestion et la planification des infrastructures reposent souvent sur des données historiques supposées stables. Cependant, le changement climatique rend cette certitude erronée, en particulier concernant les systèmes alimentés par la neige et la glace (Milly et al., 2008). Cette constatation accroît la nécessité de modéliser les risques futurs si l'on veut concevoir une planification à long terme.

• • •

Les modifications de l'enneigement et de la glaciation peuvent affecter les communautés en aval qui ne s'identifient pas nécessairement aux montagnes

Toutefois, cette modélisation requiert des données provenant de modèles climatiques à l'échelle planétaire, qui s'avèrent plus incertains au niveau des zones de haute montagne (voir chapitre 8). Il faut donc combler les lacunes en matière de suivi et d'information, notamment en établissant les coûts sanitaires, sociaux et économiques réels et en recensant les répercussions potentiellement disproportionnées en fonction des populations. Les groupes vulnérables et marginalisés, notamment les femmes, les pauvres et les populations autochtones installées en haute montagne, seront en effet davantage touchés par les conséquences du changement climatique (Caretta et al., 2022).

En tant que châteaux d'eau de la planète, les montagnes jouent un rôle fondamental dans le stockage de l'eau douce et la génération d'eaux de ruissellement. L'évolution du calendrier de la fonte des neiges saisonnière comme le passage de crues relativement fiables dues à la fonte des neiges à des régimes plus variables et moins prévisibles de pluie et de ruissellement, associé à la perte de capacité tampon des glaciers, peuvent diminuer la résilience des communautés en période de stress (Somers et al., 2019 ; Carroll et al., 2024). En règle générale, les basses terres en aval contribuent peu aux flux des rivières provenant des montagnes. Par conséquent, des communautés résidant à des milliers de kilomètres peuvent, elles aussi, dépendre des hautes montagnes pour leurs approvisionnements en eau (y compris souterraine) et bénéficier de la cryosphère de montagne en termes de résilience (Whitfield et al., 2020).

De fait, les politiques régionales, nationales et mondiales doivent être élaborées en ayant pleinement conscience du déclin des services écosystémiques fournis par la cryosphère et en y étant préparé. Les efforts d'atténuation et d'adaptation incluent une utilisation des ressources en eau urbaines et agricoles au travers de systèmes de stockage alternatifs destinés à compenser la perte de stockage de l'eau par la cryosphère, la préservation de la synchronisation des flux par des stockages en surface et sous la surface, l'amélioration des technologies d'irrigation comme de l'efficacité d'emploi de l'eau. Toutefois, bien que cette efficacité soit essentielle, les stratégies visant à réduire la demande en eau seront cruciales. Ces actions doivent être impérativement conçues au niveau local et adopter une approche protéiforme, comprenant des stratégies de réduction de la pauvreté et de promotion de l'égalité des genres comme la reconnaissance des différentes valeurs et usages culturels de l'eau.

2.4 Conclusions

Les répercussions du déclin de la cryosphère de montagne sur les ressources en eau s'avèrent complexes de même qu'elles varient selon les bassins situés en amont et les régions situées en aval. Une diminution saisonnière de l'EEN et de la durée d'enneigement entraînera une avancée de la période de fonte et une baisse du pic de l'hydrogramme de crue, avec des débits de base plus faibles en fin de saison et une plus grande dépendance à l'égard des ruissellements pluviaux et de l'écoulement des eaux souterraines. Ceci affectera les réserves en eau et accentuera la sécheresse estivale pour de vastes régions situées en aval. Avec le réchauffement atmosphérique, l'accélération du rythme de fonte des glaciers et l'ampleur croissante de celle-ci peuvent donner l'impression d'atténuer, à court terme, la diminution de l'approvisionnement en eau provenant de la fonte des neiges, en particulier pendant les périodes les plus chaudes et les plus sèches de l'année. Cependant, cette accélération et cette ampleur sont temporaires, limitées en volume et vouées à diminuer considérablement au cours du siècle.

L'intégrité des écosystèmes, la recharge des nappes phréatiques et la sécurité alimentaire dépendent fortement du moment d'apparition et de la durée des eaux de fonte. L'état de la cryosphère influe sur les risques naturels, notamment les glissements de terrain, les inondations et les coulées de débris, ainsi que sur les catastrophes naturelles à évolution

lente telles celles associées à la sécheresse. Les répercussions sur la disponibilité de l'eau et les risques encourus dépendent de nombreux facteurs, qui rendent impossibles des analyses simples et uniformes. Cette situation pose des défis pour la gestion durable et équitable de l'eau, en termes de quantité comme de qualité, aux fins de la santé et du bien-être humains, pour l'intégrité des écosystèmes terrestres et aquatiques ainsi que pour les économies et les communautés considérées aujourd'hui comme fortes.

Références

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Arenson, L. U., Harrington, J. S., Koenig, C. E. et Wainstein, P. A. 2022. « Mountain permafrost hydrology – A practical review following studies from the Andes ». *Geosciences*, vol. 12, n° 2, p. 48. doi.org/10.3390/geosciences12020048.

Arimitsu, M. L., Piatt, J. F. et Mueter, F. 2016. « Influence of glacier runoff on ecosystem structure in Gulf of Alaska fjords ». *Marine Ecology Progress Series*, vol. 560, p. 19 à 40. doi.org/10.3354/meps11888.

Aubry-Wake, C., Bertoncini, A. et Pomeroy, J. W. 2022. « Fire and ice: The impact of wildfire-affected albedo and irradiance on glacier melt ». *Earth's Future*, vol. 10, n° 4, article e2022EF002685. doi.org/10.1029/2022EF002685.

Azócar, G. F. et Brenning, A. 2010. « Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°–33°S) ». *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, n° 1, p. 42 à 53. doi.org/10.1002/ppp.669.

Barnett, T. P., Adam, J. C. et Lettenmaier, D. P. 2005. « Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions ». *Nature*, vol. 438, n° 7066, p. 303 à 309. doi.org/10.1038/nature04141.

Bernhardt, M. et Schulz, K. 2010. « SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport ». *Geophysical Research Letters*, vol. 37, n° 11. doi.org/10.1029/2010GL043086.

Bertoncini, A. 2024. *Using Enhanced Observations to Improve Streamflow Prediction in Cold Mountain River Basins*. Thèse de doctorat, Université de Saskatchewan. hdl.handle.net/10388/15563.

Bertoncini, A., Aubry-Wake, C. et Pomeroy, J. W. 2022. « Large-area high spatial resolution albedo retrievals from remote sensing for use in assessing the impact of wildfire soot deposition on high mountain snow and ice melt ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 278, article 113101. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113101.

Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C. et Verbist, K. M. 2017. « Glacial melt content of water use in the Tropical Andes ». *Environmental Research Letters*, vol. 12, n° 11, article 114014. doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c.

Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. et Supratid, S. 2022. « Water ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 551 à 712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.

Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. et Haeberli, W. 2012. « An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru ». *Climatic Change*, vol. 112, p. 733 à 767. doi.org/10.1007/s10584-011-0249-8.

Carey, M., McDowell, G., Huggel, C., Marshall, B., Moulton, H., Portocarrero, C., Provant, Z., Reynolds, J. M. et Vicuña, L. 2021. « Chapter 8 – A socio-cryospheric systems approach to glacier hazards, glacier runoff variability, and climate change ». W. Haeberli et C. Whiteman (éds), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition)*. Amsterdam/Oxford, Royaume-Uni/Cambridge, États-Unis, Elsevier, p. 215 à 257. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00018-4.

Carrivick, J. L. et Tweed, F. S. 2016. « A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods ». *Global and Planetary Change*, vol. 144, p. 1 à 16. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.

Carroll, R. W., Niswonger, R. G., Ulrich, C., Varadharajan, C., Siirila-Woodburn, E. R. et Williams, K. H. 2024. « Declining groundwater storage expected to amplify mountain streamflow reductions in a warmer world ». *Nature Water*, vol. 2, n° 5, p. 419 à 433. doi.org/10.1038/s44221-024-00239-0.

CESAP (Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique). 2023. « Climate Catastrophe in the Sikkim Himalayas: Twin Tack Resilience Strategy ». Site web du CESAP, blogs, 23 octobre 2023. www.unescap.org/blog/climate-catastrophe-sikkim-himalayas-twin-track-resilience-strategy.

Chiarle, M., Geertsema, M., Mortara, G. et Clague, J. J. 2021. « Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps ». *Global and Planetary Change*, vol. 202, article 103499. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103499.

Clague, J. J. et O'Connor, J. E. 2021. « Chapter 14 – Glacier-related outburst floods ». W. Haeberli et C. Whiteman (éds), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters (Second Edition)*. Amsterdam/Oxford, Royaume-Uni/Cambridge, États-Unis, Elsevier, p. 467 à 499. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00019-6.

Cook, S. J., Jouvet, G., Millan, R., Rabaté, A., Zekollari, H. et Dussaillant, I. 2023. « Committed ice loss in the European Alps until 2050 using a deep-learning-aided 3D ice-flow model with data assimilation ». *Geophysical Research Letters*, vol. 50, n° 23, article e2023GL105029. doi.org/10.1029/2023GL105029.

Cunsolo, A., Borish, D., Harper, S. L., Snook, J., Shiwak, I. et Wood, M. 2020. « "You can never replace the caribou": Inuit experiences of ecological grief from caribou declines ». *American Imago*, vol. 77, n° 1, p. 31 à 59. doi.org/10.1353/aim.2020.0002.

DeBeer, C. M., Sharp, M. et Schuster-Wallace, C. 2020. « Glaciers and ice sheets ». M. I. Goldstein et D. A. DellaSala (éds), *Encyclopedia of the World's Biomes*. Amsterdam/Oxford, Royaume-Uni/Cambridge, États-Unis, Elsevier, p. 182 à 194. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12441-8.

Ellis, C. R., Pomeroy, J. W. et Link, T. E. 2013. « Modeling increases in snowmelt yield and desynchronization resulting from forest gap-thinning treatments in a northern mountain headwater basin ». *Water Resources Research*, vol. 49, n° 2, p. 936 à 949. doi.org/10.1002/wrcr.20089.

Emmer, A. 2017. « Geomorphologically effective floods from moraine-dammed lakes in the Cordillera Blanca, Peru ». *Quaternary Science Reviews*, vol. 177, p. 220 à 234. doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.10.028.

Essery, R. et Pomeroy, J. 2004. « Implications of spatial distributions of snow mass and melt rate for snow-cover depletion: Theoretical considerations ». *Annals of Glaciology*, vol. 38, p. 261 à 265. doi.org/10.3189/172756404781815275.

Fang, X. et Pomeroy, J. W. 2023. « Simulation of the impact of future changes in climate on the hydrology of Bow River headwater basins in the Canadian Rockies ». *Journal of Hydrology*, vol. 620, art. 129566. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129566.

Forbes, B. C., Turunen, M. T., Soppela, P., Rasmus, S., Vuojala-Magga, T. et Kitti, H. 2019. « Changes in mountain birch forests and reindeer management: Comparing different knowledge systems in Sápmi, northern Fennoscandia ». *Polar Record*, vol. 55, n° 6, p. 507 à 521. doi.org/10.1017/S0032247419000834.

Ford, J. D., Clark, D., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Copland, L., Dawson, J., New, M. et Harper, S. L. 2019. « Changing access to ice, land and water in Arctic communities ». *Nature Climate Change*, vol. 9, n° 4, p. 335 à 339. doi.org/10.1038/s41558-019-0435-7.

Gascoin, S. 2024. « A call for an accurate presentation of glaciers as water resources ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 11, n° 2, article e1705. doi.org/10.1002/wat2.1705.

Gentle, P. et Thwaites, R. 2016. « Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal ». *Mountain Research and Development*, vol. 36, n° 2, p. 173 à 182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution des groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Équipe de rédaction principale, H. Lee et J. Romero (éds)]. Genève, GIEC, p. 1 à 34. doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

Haeberli, W., Schaub, Y. et Huggel, C. 2017. « Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges ». *Geomorphology*, vol. 293, p. 405 à 417. doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009.

Hanly, K. et McDowell, G. 2024. « The evolution of 'riskscapes': 100 years of climate change and mountaineering activity in the Lake Louise area of the Canadian Rockies ». *Climatic Change*, vol. 177, article 49. doi.org/10.1007/s10584-024-03698-2.

Harrington, J. S., Hayashi, M. et Kurylyk, B. L. 2017. « Influence of a rock glacier spring on the stream energy budget and cold-water refuge in an alpine stream ». *Hydrological Processes*, vol. 31, n° 26, p. 4719 à 4733. doi.org/10.1002/hyp.11391.

Hedstrom, N. R. et Pomeroy, J. W. 1998. « Measurements and modelling of snow interception in the boreal forest ». *Hydrological Processes*, vol. 12, n° 10-11, p. 1611 à 1625. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1611::AID-HYP684>3.0.CO;2-4.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. et Steltzer, H. 2019a. « High Mountain areas ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 131 à 202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B. E. N., Giesen, R. H., Hirabayashi, Y., Huss, M., Radić, V. et Slanger, A. B. 2019b. « GlacierMIP – A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections ». *Journal of Hydrology*, vol. 65, n° 251, p. 453 à 467. doi.org/10.1017/jog.2019.22.

Hopkinson, C. et Young, G. J. 1998. « The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951–1993 ». *Hydrological Processes*, vol. 12, n° 10–11, p. 1745 à 1762. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1745::AID-HYP692>3.E3.0.CO;2-S.

Hugonet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F. et Kääb, A. 2021. « Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century ». *Nature*, vol. 592, p. 726 à 731. doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z.

Huss, M. et Hock, R. 2018. « Global-scale hydrological response to future glacier mass loss ». *Nature Climate Change*, vol. 8, n° 2, p. 135 à 140. doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x.

ICIMOD (Centre internationale de mise en valeur intégrée des montagnes). 2022. *State of Gender Equality and Climate Change in South Asia and the Hindu Kush Himalaya*. Katmandou, ICIMOD. lib.icimod.org/record/35996.

Ilyashuk, B. P., Ilyashuk, E. A., Psenner, R., Tessadri, R. et Koinig, K. A. 2018. « Rock glaciers in crystalline catchments: Hidden permafrost-related threats to alpine headwater lakes ». *Global Change Biology*, vol. 24, n° 4, p. 1548 à 1562. doi.org/10.1111/gcb.13985.

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Vivioli, D., Wada, W., Xiao, C., Yao, T. et Baillie, J. E. M. 2020. « Importance and vulnerability of the world's water towers ». *Nature*, vol. 577, p. 364 à 369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.

Intgy, T. 2017. « High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions ». *Climatic Change*, vol. 145, n° 1, p. 41 à 55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.

Initiative pour la recherche sur la montagne, groupe de travail sur l'EDW. 2015. « Elevation-dependent warming in mountain regions of the world ». *Nature Climate Change*, Vol. 5, p. 424 à 430. doi.org/10.1038/nclimate2563.

Jakob, M., Davidson, S., Bullard, G., Busslinger, M., Collier-Pandya, B., Grover, P. et Lau, C. A. 2022. « Debris-flood hazard assessments in steep streams ». *Water Resources Research*, vol. 58, n° 4, article e2021WR030907. doi.org/10.1029/2021WR030907.

Jones, H. G., Pomeroy, J. W., Walker, D. A. et Hoham, R. W. (éds). 2001. *Snow Ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems*. Cambridge, Royaume-Uni, Cambridge University Press.

Kaser, G., Großhauser, M. et Marzeion, B. 2010. « Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 107, n° 47, p. 20223 à 20227. doi.org/10.1073/pnas.1008162107.

Khalafzai, M.-A. K., McGee, T. K. et Parlee, B. 2019. « Flooding in the James Bay region of Northern Ontario, Canada: Learning from traditional knowledge of Kashechewan First Nation ». *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 36, article 101100. doi.org/10.1016/j.ijrr.2019.101100.

Konchar, K. M., Staver, B., Salick, J., Chapagain, A., Joshi, L., Karki, S., Lo, S., Paudel, A., Subedi, P. et Ghimire, S. K. 2015. « Adapting in the shadow of Annapurna: A climate tipping point ». *Journal of Ethnobiology*, vol. 35, n° 3, p. 449 à 471. doi.org/10.2993/0278-0771-35.3.449.

Lehning, M., Löwe, H., Ryser, M. et Raderschall, N. 2008. « Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain ». *Water Resources Research*, vol. 44, n° 7. doi.org/10.1029/2007WR006545.

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E. et Revuelto, J. 2020. « Decoupling of warming mountain snowpacks from hydrological regimes ». *Environmental Research Letters*, vol. 15, n° 11, article 114006. doi.org/10.1088/1748-9326/abb55f.

López-Moreno, J. I., Pomeroy, J. W., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Navarro-Serrano, F. M., Vidaller, I. et Alonso-González, E. 2021. « Changes in the frequency of global high mountain rain-on-snow events due to climate warming ». *Environmental Research Letters*, vol. 16, n° 9, article 094021. doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dde.

Marks, D., Kimball, J., Tingey, D. et Link, T. 1998. « The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: A case study of the 1996 Pacific Northwest flood ». *Hydrological Processes*, vol. 12, n° 10 à 11, p. 1569 à 1587. doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10<1569::AID-HYP682>3.0.CO;2-L.

Mergili, M., Pudasaini, S. P., Emmer, A., Fischer, J. T., Cochachin, A. et Frey, H. 2020. « Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru) ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, n° 1, p. 93 à 114. doi.org/10.5194/hess-24-93-2020.

Miles, K. E., Hubbard, B., Irvine-Fynn, T. D., Miles, E. S., Quincey, D. J. et Rowan, A. V. 2020. « Hydrology of debris-covered glaciers in High Mountain Asia ». *Earth-Science Reviews*, vol. 207, article 103212. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103212.

Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. et Stouffer, R. J. 2008. « Stationarity is dead: Whither water management? ». *Science*, vol. 319, n° 5863, p. 573 à 574. doi.org/10.1126/science.1151915.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. et Brown, L. E. 2017. « Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n° 37, p. 9770 à 9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

Müller, T., Lane, S. N. et Schaeefli, B. 2022. « Towards a hydrogeomorphological understanding of proglacial catchments: An assessment of groundwater storage and release in an Alpine catchment ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 26, n° 23, p. 6029 à 6054. doi.org/10.5194/hess-26-6029-2022.

Norton-Smith, K., Lynn, K., Chief, K., Cozzetto, K., Donatuto, J., Hiza Redsteer, M., Kruger, L. E., Maldonado, J., Viles, C. et Whyte, K. P. 2016. *Climate Change and Indigenous Peoples: A Synthesis of Current Impacts and Experiences*. Rapport technique PNW-GTR-944. Portland, États-Unis, Ministère de l'agriculture des États-Unis, Service des forêts, Département de recherche du nord-ouest du Pacifique. doi.org/10.2737/PNW-GTR-944.

Nyima, Y. et Hopping, K. A. 2019. « Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment ». *Society and Natural Resources*, vol. 32, n° 9, p. 965 à 982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.

O'Neal, S., Hood, E., Bidlack, A. L., Fleming, S. W., Arimitsu, M. L., Arendt, A., Burgess, E., Sergeant, C. J., Beaudreau, A. H., Timm, K., Hayward, G. D., Reynolds, J. H. et Pyare, S. 2015. « Icefield-to-ocean linkages across the northern Pacific coastal temperate rainforest ecosystem ». *BioScience*, vol. 65, n° 5, p. 499 à 512. doi.org/10.1093/biosci/biv027.

Pépin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzaghi, S., Thornton, J. M., Vuille, M. et Adler, C. 2022. « Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world ». *Reviews of Geophysics*, vol. 60, n° 1, article e2020RG000730. doi.org/10.1029/2020RG000730.

Pomeroy, J. W. et Li, L. 2000. « Prairie and arctic areal snow cover mass balance using a blowing snow model ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 105, no D21, p. 26619 à 26634. doi.org/10.1029/2000JD900149.

Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M. et Lopéz Moreno, J. L. 2022. « The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding ». *Journal of Hydrology*, vol. 615, article 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.

Postigo, J. C. 2020. « The role of social institutions in Indigenous Andean pastoralists' adaptation to climate-related water hazards ». *Climate and Development*, vol. 13, n° 9, p. 780 à 791. doi.org/10.1080/17565529.2020.1850409.

Rasmus, S., Turunen, M., Luomaranta, A., Kivinen, S., Jylhä, K. et Räihä, J. 2020. « Climate change and reindeer management in Finland: Co-analysis of practitioner knowledge and meteorological data for better adaptation ». *Science of the Total Environment*, vol. 710, article 136229. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136229.

Rasouli, K., Pomeroy, J. W. et Whitfield, P. H. 2019. « Are the effects of vegetation and soil changes as important as climate change impacts on hydrological processes? ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 23, n° 12, p. 4933 à 4954. doi.org/10.5194/hess-23-4933-2019.

Rounce, D. R., Hock, R., Maussion, F., Hugonnet, R., Kochtitzky, W., Huss, M., Berthier, E., Compagno, L., Copland, L., Farinotti, D., Menounos, B. et McNabb, R. W. 2023. « Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters ». *Science*, vol. 379, n° 6627, p. 78 à 83. doi.org/10.1126/science.abo1324.

Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E. et Valois, R. 2019. « Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes ». *Regional Environmental Change*, vol. 19, p. 1263 à 1279. doi.org/10.1007/s10113-018-01459-3.

Sepúlveda, S. A., Tobar, C., Rosales, V., Ochoa-Cornejo, F. et Lara, M. 2023. « Megalandslides and deglaciation: Modelling of two case studies in the Central Andes ». *Natural Hazards*, vol. 118, n° 2, p. 1561 à 1572. doi.org/10.1007/s11069-023-06067-x.

Sharp, M. et Tranter, M. 2017. « Glacier biogeochemistry ». *Geochemical Perspectives*, vol. 6, n° 2, p. 173 à 174. doi.org/10.7185/geochempersp.6.2.

Shrestha, A. B., Eriksson, M., Mool, P., Ghimire, P., Mishra, B. et Khanal, N. R. 2010. « Glacial lake outburst flood risk assessment of Sun Koshi basin, Nepal ». *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 1, n° 2, p. 157 à 169. doi.org/10.1080/19475701003668968.

Somers, L. D. et McKenzie, J. M. 2020. « A review of groundwater in high mountain environments ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 7, n° 6, article e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.

Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G. H. C., Wickert, A. D., Yarleque, C., Baraer, M. et Silva, Y. 2019. « Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed – but not forever ». *Geophysical Research Letters*, vol. 46, n° 22, p. 13016 à 13026. doi.org/10.1029/2019GL084730.

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. et Zimmermann, M. 2018. « Analysis of weather-and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases ». S. Mal, R. Singh et C. Huggel (éds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Suisse, Springer, p. 17 à 41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Vivioli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. et Adler, C. 2022. « Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls ». *PLoS ONE*, vol. 17, n° 7, article e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

UNESCO/UICN (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture/Union internationale pour la conservation de la nature). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. Paris/Gland, Suisse, UNESCO/UICN. doi.org/10.3929/ethz-b-000578916.

USGS (Institut d'études géologiques des États-Unis). 2013. « Glossary of Glacier Terminology ». Site web de l'USGS. [www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sublimation-and-water-cycle#:~:text=Sublimation%20is%20the%20conversion%20between,with%20no%20intermediate%20liquid%20stage](http://pubs.usgs.gov/of/2004/1216/f/f.html#:~:text=An%20intermediate%20stage%20in%20the,takes%20less%20than%20a%20year) (consulté le 22 juillet 2024).

—. 2019. « Sublimation and the Water Cycle ». Site web de l'USGS. www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/sublimation-and-water-cycle#:~:text=Sublimation%20is%20the%20conversion%20between,with%20no%20intermediate%20liquid%20stage (consulté le 22 juillet 2024).

Vahedifard, F., Abdollahi, M., Leshchinsky, B. A., Stark, T. D., Sadegh, M. et AghaKouchak, A. 2024. « Interdependencies between wildfire-induced alterations in soil properties, near-surface processes, and geohazards ». *Earth sciences*, vol. 11, n° 2, article e2023EA003498. doi.org/10.1029/2023EA003498.

Van Tiel, M., Aubry-Wake, C., Somers, L., Andermann, C., Avanzi, F., Baraer, M., Chiogna, G., Daigre, C., Das, S., Drenkhan, F., Farinotti, D., Fyffe, C. L., de Graaf, I., Hanus, S., Immerzeel, W., Koch, F., McKenzie, J. M., Müller, T., Popp, A. L., Saidaliyeva, Z., Schaeffli, B., Schilling, O. S., Teagai, K., Thornton, J. M. et Yapiyev, V. 2024. « Cryosphere–groundwater connectivity is a missing link in the mountain water cycle ». *Nature Water*, vol. 2, n° 7, p. 624 à 637. doi.org/10.1038/s44221-024-00277-8.

Vanderwall, J. W., Muhlfeld, C. C., Tappenbeck, T. H., Giersch, J., Ren, Z. et Elser, J. J. 2024. « Mountain glaciers influence biogeochemical and ecological characteristics of high-elevation lakes across the northern Rocky Mountains, USA ». *Limnology and Oceanography*, vol. 69, n° 1, p. 37-52. doi.org/10.1002/limo.12434.

Verrall, B. et Pickering, C. M. 2020. « Alpine vegetation in the context of climate change: A global review of past research and future directions ». *Science of the Total Environment*, vol. 748, article 141344. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141344.

Vivioli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. et Wada, Y. 2020. « Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources ». *Nature Sustainability*, vol. 3, n° 11, p. 917 à 928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wedgwood, R. 2014. « Gone like a ghost: The Ghost Glacier Failure and Subsequent Outburst Flood, Mt. Edith Cavell, Jasper National Park ». Sixième conférence canadienne sur les géorisques – GéoRisques 6. cgs.ca/docs/geohazards/kingston2014/Geo2014/pdfs/geoHaz6Paper201.pdf.

Westerling, A. L., Hidalgo, H. G., Cayan, D. R. et Swetnam, T. W. 2006. « Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity ». *Science*, vol. 313, n° 5789, p. 940 à 943. doi.org/10.1126/science.1128834.

Whitfield, P. H., Kraaijenbrink, P. D., Shook, K. R. et Pomeroy, J. W. 2020. « The spatial extent of hydrological and landscape changes across the mountains and prairies of the Saskatchewan and Mackenzie basins ». *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, p. 1 à 68. doi.org/10.5194/hess-2019-671.

Williamson, C. J., Cameron, K. A., Cook, J. M., Zarsky, J. D., Stibal, M. et Edwards, A. 2019. « Glacier algae: A dark past and a darker future ». *Frontiers in Microbiology*, vol. 10, art. 436973. doi.org/10.3389/fmicb.2019.00524.

Yager, K., Valdivia, C., Slayback, D., Jiménez, E., Meneses, R. I., Palabral, A., Bracho, M., Romero, D., Hubbard, A., Pacheco, P., Calle, A., Alberto, H., Yana, O., Ulloa, D., Zeballos, G. et Romero, A. 2019. « Socio-ecological dimensions of Andean pastoral landscape change: Bridging traditional ecological knowledge and satellite image analysis in Sajama National Park, Bolivia ». *Regional Environmental Change*, vol. 19, n° 5, p. 1353 à 1369. doi.org/10.1007/s10113-019-01466-y.

Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S. et Cogley, J. G. 2019. « Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 ». *Nature*, vol. 568, n° 7752, p. 382 à 386. doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0.

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Shangguan, D. et Luo, X. 2021. « Albedo reduction as an important driver for glacier melting in Tibetan Plateau and its surrounding areas ». *Earth-Science Reviews*, vol. 220, article 103735. doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103735.

Chapitre 3

Alimentation et agriculture

FAO

Matthew England, Patricia Mejías-Moreno, Jippe Hoogeveen,
Rosalaura Romeo, Sara Manuelli et Fabio Parisi

3.1 Sécurité alimentaire et agriculture

• • •
*L'agriculture et
l'élevage assurent
une bonne part
de la subsistance
des habitants
des régions
montagneuses*

Le présent chapitre s'articule autour de trois sujets principaux : l'état de la sécurité alimentaire et de l'agriculture en montagne, les défis posés par le changement climatique et d'autres facteurs affectant la disponibilité de l'eau pour l'agriculture et la sécurité alimentaire ; enfin, des actions possibles pour y répondre.

3.1.1 La sécurité alimentaire dans les montagnes

L'agriculture et l'élevage assurent une bonne part de la subsistance⁹ des habitants des régions montagneuses¹⁰ (FAO, 2019), dont le nombre est estimé à 1,1 milliard. Dans les pays en développement, on évalue à 648 millions, le nombre de personnes vivant en zone rurale au sein des régions montagneuses. Pour la plupart, ils tirent leurs moyens de subsistance de l'agriculture et de l'élevage. En 2017, plus de la moitié d'entre elles (346 millions) étaient considérées comme exposées à l'insécurité alimentaire. En d'autres termes, un habitant sur deux des zones rurales de montagne dans les pays en développement vivait dans des lieux où la disponibilité quotidienne de calories et de protéines se situait en dessous du seuil minimum nécessaire à une vie saine (Romeo et al., 2020). Dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch, l'insécurité alimentaire touche même plus de 30 % de la population des montagnes, les femmes et les enfants étant les plus exposés (Wester et al., 2019).

Parmi les éléments contribuant à l'insécurité alimentaire dans les montagnes figurent la variabilité climatique, les phénomènes météorologiques extrêmes, les catastrophes causées par les risques naturels, la géographie et le contexte socio-économique (encadré 3.1). L'éloignement et l'inaccessibilité (la distance depuis les routes et les marchés alimentaires par exemple), les saisons de culture, les conflits, la dégradation des terres (qui entraîne une mauvaise qualité des sols), les grandes variations des réserves d'eau pour l'agriculture et les faibles niveaux de mécanisation (Romeo et al., 2020) peuvent constituer des obstacles supplémentaires à la sécurité alimentaire.

Dans les bassins fluviaux alimentés par la fonte de la cryosphère, la productivité agricole des basses terres en aval se trouve menacée par la fonte de la cryosphère. L'augmentation des niveaux de fonte de la neige et de la glace entraîne une plus grande variabilité saisonnière (dans le temps et en quantité) des ruissellements et du débit des cours d'eau (Viviroli et al., 2020). Ce phénomène a été constaté, par exemple, dans les plaines indo-gangétiques d'Asie du Sud, où il pose des problèmes, au sein du bassin de l'Indus, aux agriculteurs qui ont besoin de la fonte de la cryosphère pour l'irrigation pendant la saison sèche (Biemans et al., 2019).

3.1.2 L'agriculture de montagne

L'agriculture de montagne désigne, au sens large, les activités agricoles réalisées sur des terrains situés à haute altitude et sur les pentes des montagnes, y compris les pratiques de récupération et de conservation de l'eau. Ces activités englobent plusieurs systèmes de production agricole, notamment les cultures pluviales et irriguées, l'agriculture pastorale et agro-pastorale, la sylviculture et l'agroforesterie, la pêche en eau douce et l'aquaculture (FAO, 2022). L'agriculture de montagne se caractérise par des parcelles petites et fragmentées, cultivées principalement par de

⁹ Au même titre que d'autres sources de revenus non agricoles tels les envois de fonds, les petites entreprises, les plantes médicinales, la main-d'œuvre salariée et le tourisme (FAO, 2019).

¹⁰ L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture utilise la définition des montagnes que donne le Centre mondial de surveillance pour la conservation du Programme des Nations Unies pour l'environnement (Romeo et al., 2020, p. 8).

Encadré 3.1 Sécurité alimentaire et objectifs de développement durable (ODD)

« La sécurité alimentaire existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, un accès physique et économique à une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active » (FAO, 1996, paragraphe 1). La sécurité alimentaire comporte quatre aspects : la disponibilité, l'accessibilité, l'utilisation et la stabilité (FAO, 2014).

La disponibilité alimentaire fait référence à la disponibilité matérielle de nourriture en quantité suffisante dans une zone donnée.

L'accessibilité alimentaire correspond à la possibilité d'accès physique et financier à la nourriture.

L'utilisation alimentaire renvoie à la qualité, à la sûreté et à l'absorption des aliments, accompagnées d'un état de santé approprié.

La stabilité alimentaire est atteinte lorsque la disponibilité, l'accessibilité et l'utilisation alimentaires sont garanties tout au long de l'année et sur une longue période (Groupe de la Banque mondiale, s.d.).

La sécurité alimentaire est essentielle à la réalisation de nombreux objectifs de développement durable, notamment l'ODD 1 (éliminer la pauvreté), l'ODD 2 (éliminer la faim), l'ODD 3 (bonne santé et bien-être), l'ODD 6 (eau propre et assainissement), l'ODD 12 (consommation et production responsables) et l'ODD 13 (lutte contre le changement climatique) ainsi que l'indicateur 15.4.2 des ODD (indice du couvert végétal montagneux).

• • •

Les communautés des régions montagneuses cultivent des variétés végétales et des plantes médicinales parmi les plus rares

petits exploitants¹¹. On estime que 45 % des régions montagneuses du monde ne se prêtent pas, ou seulement de façon marginale, à l'agriculture, à l'élevage ou aux activités forestières (Romeo et al., 2020). En effet, plus l'altitude augmente, moins les sols sont profonds et fertiles tandis que les températures plus basses entraînent un ralentissement de l'activité biologique. Dans les zones les plus exposées, les sols sont souvent soumis au lessivage des nutriments par l'eau et l'érosion éolienne. Par conséquent, les sols montagneux sont souvent moins fertiles et plus vulnérables que les sols des basses terres (FAO, 2015a).

Les montagnes possèdent des caractéristiques particulières qui ne sont pas sans incidence sur le développement agricole, notamment des flancs abrupts et inclinés, des crêtes et des sommets escarpés ou arrondis. Dès lors, les surfaces cultivées sont souvent réduites et le recours à la mécanisation est limité. Bon nombre d'agriculteurs de montagne ont abandonné les systèmes agricoles traditionnels et dépendent de plus en plus des cultures commerciales pour leur subsistance (FAO, 2019). De plus, les conditions climatiques liées à l'altitude varient considérablement, entraînant d'importantes fluctuations de température quotidiennes et saisonnières. En raison de températures plus basses en altitude, les cultures poussent moins vite et les agriculteurs ne font généralement qu'une seule récolte par an (FAO, 2015b).

¹¹ Il s'agit de petits exploitants agricoles, d'éleveurs, de gardes forestiers et de pêcheurs qui s'occupent de terres dont la superficie est comprise entre moins de 1 hectare et 10 hectares. Ces petits exploitants obéissent à des logiques de travail axées sur la famille : ils privilient la stabilité du système d'exploitation familiale, utilisent principalement la main-d'œuvre familiale pour la production et destinent une partie de la production à leur propre consommation.

• • •

La culture en terrasse est une pratique courante sur les pentes des montagnes à travers le monde

Les communautés des régions montagneuses cultivent des variétés végétales et des plantes médicinales parmi les plus rares. Grâce aux connaissances et aux méthodes traditionnelles qu'elles ont acquises au fil du temps dans les domaines de la culture, de l'élevage et de la collecte de l'eau, elles contribuent à la préservation d'écosystèmes entiers (Romeo et al., 2020).

Systèmes de production agricole irrigués et pluviaux

L'agriculture irriguée est généralement pratiquée dans les régions montagneuses arides et semi-arides, où les précipitations sont inférieures à 350 mm par an. Les sources d'eau employées pour l'irrigation incluent les puits artésiens profonds, l'eau de rivière, l'eau stockée localement et l'eau de pluie recueillie par captage. Les agriculteurs qui utilisent des systèmes d'irrigation tendent à diversifier leur production afin de garantir leur sécurité alimentaire, notamment en cultivant des produits à forte valeur ajoutée, des légumes, des arbres fruitiers et des plantes ornementales. Des cultures de plein champ tels le riz, le blé et le maïs sont aussi pratiquées (FAO, 2022).

Pour sa part, l'agriculture pluviale de montagne se pratique lorsque les précipitations sont supérieures à 400 mm pendant la saison humide. Elle est souvent utilisée comme méthode d'agriculture de conservation puisqu'elle permet une perturbation minimale du sol ou un léger labour, la rétention des chaumes et la rotation des cultures. Les cultures pluviales comprennent les céréales telles que l'orge, le maïs, le riz et le blé, les légumineuses telles que les pois chiches, les pois et les lentilles, les cultures horticoles telles que les arbres fruitiers, les vignes, les légumes et les plantes médicinales (FAO, 2019 ; 2022).

La culture de montagne en terrasse

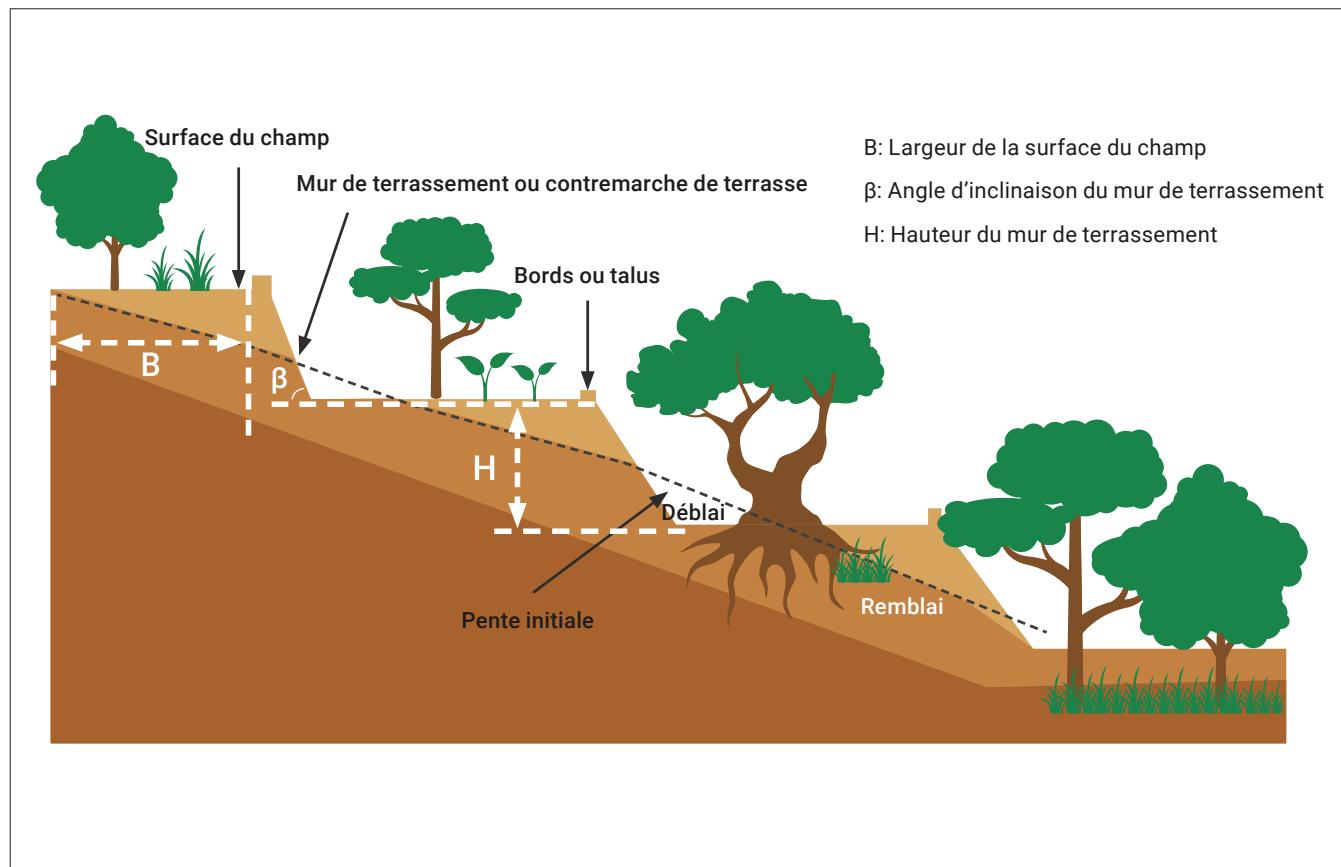
La culture en terrasse est une pratique courante sur les pentes des montagnes à travers le monde (Chapagain et Raizada, 2017 ; FAO, 2022). Pour les petits exploitants agricoles, il s'agit d'une source importante de production alimentaire et de revenus de subsistance. Vieille de milliers d'années, sa pratique remonte au V^e siècle avant notre ère en Chine et au Yémen (FAO, 2019).

La culture en terrasse se prête aux reliefs pentus que l'on trouve dans les régions montagneuses. Elle consiste à aménager des déblais et des remblais le long de la pente (figure 3.1) afin d'étendre la superficie des terres arables par des aires de remplissage. La largeur d'une terrasse dépend de l'inclinaison de la pente : plus la pente est raide, plus la terrasse est étroite et plus le mur de terrassement est élevé. Les crêtes ou les talus y jouent un rôle important pour intercepter les eaux de ruissellement (Deng et al., 2021).

Si elles sont bien pensées, bien aménagées et bien entretenues, les cultures en terrasse offrent de nombreux avantages (FAO, 2019) parmi lesquels la diminution du ruissellement des eaux de surface, la conservation des ressources en eau, la réduction de l'érosion des sols, la stabilisation des pentes, l'amélioration de l'habitat et de la biodiversité ainsi que la préservation du patrimoine culturel (encadré 3.2) (Deng et al., 2021).

De nombreuses plantes peuvent être cultivées en terrasse, aussi bien les cultures de plein champ et les cultures horticoles, le fourrage et d'autres cultures qui nécessitent des pratiques de gestion spécifiques (telle l'irrigation) que des plantations agroforestières et d'aquaculture. La plupart des cultures en terrasse relèvent de l'agriculture pluviale. Par conséquent, de nombreuses terrasses ne sont pas aussi productives que les exploitations qui bénéficient d'une mécanisation et d'une irrigation appropriées (Chapagain et Raizada, 2017).

Figure 3.1 Schéma en coupe de terrasses construites dans la pente



Source : d'après Deng et al. (2021, figure 1, p. 345).

• • •

Les pratiques d'arboriculture non durables peuvent aggraver l'érosion des sols et réduire l'infiltration des eaux

L'un des inconvénients de cette pratique agricole réside dans le risque d'effondrement des terrasses – plus le mur est haut, plus le risque d'effondrement est élevé. D'autres inconvénients viennent encore restreindre la production : des terrains étroits et limités pour la culture, des besoins importants en main-d'œuvre, des difficultés à recourir à la mécanisation au-delà des outils traditionnels et un accès insuffisant aux intrants, aux marchés et aux services agricoles (Deng et al., 2021). C'est pourquoi la plupart des exploitations en terrasse sont gérées de façon traditionnelle à l'aide d'outils simples, d'une force de traction animale limitée et d'une main-d'œuvre familiale relativement abondante. Un petit nombre d'exploitations en terrasse ont toutefois abandonné les techniques traditionnelles au profit de techniques plus modernes (FAO, 2019).

Les systèmes de production d'élevage pastoral et agropastoral

Les troupeaux d'élevage pastoral se nourrissent d'une végétation arrosée par les pluies tels les graminées, les légumineuses, les arbustes et d'autres végétaux qui servent de fourrage. L'élevage pastoral reste courant dans de nombreuses régions montagneuses et de haute altitude comme sur la steppe tibétaine située à plus de 4 000 mètres au-dessus du niveau de la mer (Sheehy et al., 2006). Un pâturage excessif peut entraîner la dégradation des prairies, l'érosion des sols et la perte de biodiversité. Les systèmes agropastoraux, quant à eux, englobent l'élevage de différents types de bétail, des pâturages naturels et diverses cultures de plein champ tels l'orge, le fourrage, les arbustes et les arbres (FAO, 2022).

Encadré 3.2 Le système de rizières en terrasse des Hani de Honghe

D'une superficie d'environ 70 000 hectares, le système de rizières en terrasse des Hani de Honghe s'étage sur les pentes méridionales du mont Ailao, dans la province du Yunnan en Chine. Il est alimenté par un réseau complexe de canaux qui détournent l'eau des sommets boisés de la montagne jusqu'aux terrasses rizicoles. Ce système fournit une multitude de biens et de services aux habitants de la région, contribuant à satisfaire leurs besoins en nourriture et en combustible, tout en assurant la conservation écologique et en préservant les pratiques culturelles locales (FAO, 2019). Il permet également de maintenir les cultures vivrières traditionnelles et la diversité agricole grâce aux 195 variétés de riz qui y sont cultivées, dont 48 sont des variétés endémiques. Cependant, les pratiques agricoles axées sur le rendement élevé et la monoculture, auxquelles s'ajoute l'essor du tourisme, menacent l'équilibre de rizières en terrasse des Hani de Honghe (Yang et al., 2017).



Système de rizières en terrasse des Hani de Honghe dans la province du Yunnan en Chine

Photographie : © FAO/Min Qingwen*.

En 2010, les rizières en terrasse des Hani de Honghe ont été reconnues comme appartenant aux Systèmes ingénieux du patrimoine agricole mondial (SIPAM) en tant que système d'union entre forêt, village, terrasse, eau et culture. Les SIPAM regroupent des systèmes d'emploi des terres ou des paysages remarquables, riches d'une biodiversité significative, qui résultent de l'adaptation d'une communauté à son environnement (FAO, 2019). Le programme SIPAM a pour objectif de favoriser la reconnaissance internationale de tels systèmes comme leur conservation dynamique et leur gestion durable. Les fonctions agricoles des SIPAM comprennent la subsistance, la conservation des paysages, la conservation de l'agrobiodiversité, les savoirs traditionnels et les services écosystémiques.

Lancé en 2002, le programme SIPAM est devenu un programme officiel de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 2015. En 2024, la distinction SIPAM avait été attribuée à 89 sites répartis dans 28 pays (FAO, 2024). Les SIPAM constituent de vrais exemples de pratiques agricoles durables qui contribuent à la sécurité alimentaire et à la subsistance de petites communautés rurales tout en conservant les cultures et les savoirs traditionnels comme en renforçant la résilience (FAO, 2019). Une part importante des SIPAM se situent en montagne, où sont utilisés des outils et des méthodes traditionnels qui ont fait leurs preuves au fil des siècles.

• • •
À l'échelle mondiale, l'eau des montagnes contribue de manière significative à l'irrigation des basses terres

3.2 Défis pour l'agriculture de montagne et la sécurité alimentaire

Les systèmes de production forestière et agroforestière

Les exploitations forestières et agroforestières constituent d'importantes sources de revenus au sein des régions montagneuses car elles fournissent des biens et des services environnementaux essentiels tels le bois d'œuvre, le bois de chauffage, le stockage du carbone et autres produits qui améliorent la vie des populations vivant dans ces régions (voir chapitre 6). Les forêts couvrent environ 40 % des régions montagneuses, apportant une protection contre les catastrophes naturelles du fait de leur capacité à stabiliser les pentes abruptes, à réguler l'écoulement des eaux souterraines, à réduire le ruissellement de surface et l'érosion des sols ainsi qu'à atténuer les risques de glissements de terrain et d'inondations. A contrario, des pratiques d'arboriculture non durables peuvent aggraver l'érosion des sols et réduire l'infiltration des eaux (Romeo et al., 2021 ; FAO, 2022).

Aquaculture et pêche en eau douce

Dans les régions montagneuses enclavées, dépourvues d'accès aux ressources halieutiques marines, les poissons de lacs, de rivières et de réservoirs constituent une importante source de protéines animales de façon souvent saisonnière (Petr et Swar, 2002 ; Alpiev et al., 2013). En montagne, la pêche se pratique à une échelle relativement petite (FAO, 2003), de sorte que les systèmes intégrés d'agriculture et d'aquaculture peuvent jouer un rôle particulièrement crucial dans ces régions. Pour ne citer qu'un exemple, la pisciculture pratiquée sur les terrasses rizicoles de montagne permet de renforcer la productivité, la rentabilité et la durabilité des sols. En effet, la présence de poissons améliore la fertilité des sols par un apport accru en oxygène comme par le dépôt d'azote et de phosphore. Les poissons contribuent également à lutter contre les parasites du riz, en éliminant les mauvaises herbes aquatiques et les algues qui abritent les parasites entrant en compétition avec le riz pour les nutriments. En contrepartie, la riziculture fournit aux poissons de la nourriture planctonique, périphtylique et benthique. Les ombres des plants de riz permettent de garder l'eau à bonne température, ce qui permet aux poissons de prospérer pendant les mois chauds de l'été (Chapagain et Raizada, 2017).

3.1.3 Dépendance des basses terres envers les eaux de montagne pour l'agriculture (irriguée)

À l'échelle mondiale, l'eau des montagnes contribue de manière significative à l'irrigation des basses terres. Selon les estimations, cette contribution varie en fonction des bassins fluviaux et des régions (Viviroli et al., 2020). Certaines zones du bassin de l'Indus par exemple dépendent particulièrement des eaux de montagne, notamment de la fonte de la cryosphère, sans lesquelles il ne serait pas possible d'irriguer les basses terres pendant la saison sèche (Biemans et al., 2019). L'utilisation de l'eau des montagnes à des fins d'irrigation est relativement plus importante dans les bassins où les autres sources d'eau bleue sont restreintes (Viviroli et al., 2020).

Dans les régions de haute montagne comme en Afghanistan, en Inde et au Pakistan, l'eau de fonte des neiges et des glaciers est utilisée pour l'irrigation et contribue à maintenir l'humidité des sols des pâturages et des prairies (Rasul et Molden, 2019).

3.2.1 Les conséquences de la fonte de la cryosphère causée par le changement climatique

Les variations des rythmes de fonte des glaciers et de la neige ont une incidence sur les périodes et les volumes de ruissellement des eaux, et de fait sur la disponibilité de celles-ci pour l'agriculture irriguée. Il s'agit là d'un fait d'une importance cruciale pour la production agricole en montagne mais aussi dans les basses terres en aval (Milner et al., 2017 ; Hock

et al., 2019). Or, les niveaux élevés de pauvreté et d'insécurité alimentaire dans certaines communautés de montagne les rendent encore plus vulnérables aux effets, sur l'agriculture, des modifications de la cryosphère (Adler et al., 2022). Tel est le cas, par exemple, dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch (McDowell et al., 2019 ; Rasul et Molden, 2019).

Dans les bassins et les cours d'eau alimentés par les glaciers, on observe, sur une année, un pic de fonte des neiges plus précoce au printemps. Pour les agriculteurs, il en résulte des difficultés à prévoir avec précision le moment où les systèmes d'irrigation seront alimentés en eau et à gérer les calendriers de plantation des cultures de printemps. La fonte des glaciers et les ruissellements sont les plus importants en été et durant la journée, lorsque les températures de l'air et le rayonnement solaire sont les plus élevés. Dans certains bassins versants tributaires du bilan de masse des glaciers et des conditions hydrologiques locales, il est possible que les agriculteurs bénéficient d'une fonte et de ruissellements plus importants en été étant donné qu'ils disposeront alors de plus larges volumes d'eau pour l'irrigation pendant la saison sèche. Toutefois, l'augmentation des eaux de fonte estivales entraîne également des risques d'inondations au niveau local (Hock et al., 2019).

• • •

La réduction du manteau neigeux peut avoir une incidence sur l'agriculture de par ses effets directs sur l'humidité des sols

Au fil du temps, au fur et à mesure que la masse des glaciers diminue, les ruissellements annuels augmentent d'abord dans les bassins et les cours d'eau alimentés par ceux-ci. Au bout de quelques années ou décennies, un point de bascule, appelé pic d'eau (voir encadré 2.2), est atteint, après quoi les ruissellements des eaux de fonte diminuent du fait d'une diminution de la masse glaciaire, ce qui peut entraîner une baisse de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et l'agriculture. Tout porte à croire que le pic d'eau a déjà été atteint en ce qui concerne les cours d'eau alimentés par les glaciers des Andes tropicales, de l'ouest du Canada et des Alpes suisses (Hock et al., 2019). En revanche, aucune étude n'a été menée sur les limites et la temporalité que suit l'augmentation des eaux de fonte des glaciers de la région himalayenne de l'Hindou Kouch dans son ensemble (Wester et al., 2019).

Les conséquences de la fonte de la cryosphère sur l'agriculture dans les régions montagneuses

Agriculture irriguée et pluviale

Il semblerait que, dans plusieurs régions montagneuses, la diminution du débit des cours d'eau due à la fonte des glaciers ou à la réduction du manteau neigeux ait entraîné une moindre disponibilité de l'eau pour l'irrigation des cultures, conduisant à une baisse des rendements agricoles (Hock et al., 2019). C'est notamment le cas des Andes péruviennes – où le recul des glaciers a entraîné une réduction des ruissellements saisonniers avec des conséquences négatives sur les cultures (Bury et al., 2011) – et des montagnes du Karakoram au Pakistan – où la disponibilité saisonnière de l'eau pour les cultures irriguées a été réduite en raison du recul des glaciers et de la réduction du manteau neigeux (Nüsser et Schmidt, 2017 ; Nüsser et al., 2019). À l'inverse, dans le sud des Andes, l'augmentation des eaux de fonte due au recul des glaciers a entraîné une augmentation de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et, partant, une hausse des rendements agricoles (Young et al., 2010).

La réduction du manteau neigeux peut avoir une incidence sur l'agriculture de par ses effets directs sur l'humidité des sols. De cette humidité obtenue par une irrigation dérivant de la fonte des glaciers et des neiges, les communautés rurales ont besoin pour pouvoir planter leurs cultures (Hock et al., 2019). Au Népal, la réduction du manteau neigeux a entraîné l'assèchement des sols et la baisse des rendements de la production de pommes de terre et de fourrage (Smadja et al., 2015).

L'élevage

Les modifications des régimes hydrologiques et de température peuvent affecter l'élevage en montagne (Hock et al., 2019). « Dans l'Himalaya (Namgay et al., 2014) et dans les montagnes scandinaves (Mallory et Boyce, 2018), les changements au niveau de la neige et des glaciers compromettent les activités des éleveurs qu'ils soient dans leur résidence d'été ou leur campement hivernal. En raison de la réduction des chutes de neige en hiver, la qualité des pâturages [pour la consommation du bétail] s'est dégradée au Népal (Gentle et Maraseni, 2012) et en Inde (Ingty, 2017). [...] Au Népal, les éleveurs ont fait état de pénuries d'eau au niveau des sources d'eau traditionnelles qui jalonnent les itinéraires de migration (Gentle et Thwaites, 2016). Sur le plateau tibétain, l'augmentation des eaux de fonte des glaciers a entraîné une augmentation de la taille des lacs, qui recouvrent désormais des zones de pâturage et contraignent les éleveurs à modifier leurs parcours de déplacement saisonnier (Nyima et Hopping, 2019). Toutefois, la hausse des températures, associée aux effets qu'elle produit sur le manteau neigeux, a des impacts positifs. Dans le nord du Pakistan, les migrations saisonnières [...] commencent ainsi plus tôt et les installations sur les pâturages d'été durent plus longtemps (Joshi et al., 2013), tout comme en Afghanistan (Shaoliang et al., 2012) » (Hock et al., 2019, p. 172).

Les conséquences de la fonte de la cryosphère sur l'agriculture dans les bassins fluviaux

En été, l'irrigation pratiquée dans les basses terres en aval des montagnes repose en grande partie sur les eaux de fonte des glaciers, qui constituent une importante source d'eau pendant la saison sèche. Ces eaux peuvent réduire la variabilité des ruissellements fluviaux d'une année sur l'autre, sur des étendues de plusieurs centaines de kilomètres dans certains cas (Hock et al., 2019).

Dans certaines régions, on prévoit que les zones agricoles des terres de basse altitude qui reçoivent de l'eau d'irrigation provenant de cours d'eau alimentés par la fonte des glaciers et de la neige subissent des effets négatifs en raison de la réduction de la fonte et des ruissellements due à la diminution progressive de la masse glaciaire et du manteau neigeux (Hock et al., 2019 ; Vivioli et al., 2020). Ainsi, les systèmes fluviaux, comme l'Indus, qui prennent leur source dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch dépendent fortement des eaux de fonte des glaciers et de la neige pour irriguer les cultures lors de la saison sèche avant la mousson, et sont particulièrement vulnérables à la réduction de la fonte due à la réduction de masse de ceux-ci (Biemans et al., 2019 ; 2019 ; Nie et al., 2021 ; Lutz et al., 2022 ; Molden et al., 2022) (encadré 3.3). En outre, le début de la fonte printanière et le pic de fonte des eaux de neige n'étant plus les mêmes dans le temps, le moment d'arrivée de l'eau d'irrigation en aval dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch et en Asie centrale devraient s'en trouver modifié (Hock et al., 2019), notamment en ce qui concerne l'eau provenant du manteau neigeux et des glaciers des monts Tien Shan en Asie centrale (Xenarios et al., 2018).

3.2.2 Autres conséquences du changement climatique

L'agriculture irriguée et l'agriculture pluviale subissent les effets de la variabilité croissante des précipitations saisonnières et annuelles, si bien que les agriculteurs ont du mal à planifier correctement leurs calendriers de plantation et la gestion de l'eau destinée à leurs cultures. Sous l'effet de l'augmentation des températures atmosphériques, l'évapotranspiration au niveau des cultures est plus importante, nécessitant plus d'eau pour maintenir un rendement optimal des cultures. En outre, la variabilité des précipitations et des chutes de neige – provoquant, dans certains cas, des sécheresses – compromet la croissance de la végétation des prairies et des pâturages extensifs, ayant des répercussions négatives sur le bétail et les moyens de subsistance des éleveurs (Hock et al., 2019). Par exemple, les éleveurs d'Afghanistan, du Népal et du Pakistan ont constaté que les chutes de neige erratiques et la diminution des précipitations ont provoqué une baisse de la qualité et de la quantité de végétation (Gentle et Thwaites, 2016).

Encadré 3.3 Dépendance du bassin indo-gangétique envers les eaux de fonte de la cryosphère

Dans le bassin de l'Indus avant la mousson, les volumes d'eau prélevés à des fins d'irrigation proviennent pour jusqu'à 60 % de la fonte des glaciers et des neiges de montagne, contribuant ainsi à 11 % de la production agricole totale. Dans certaines zones irriguées situées en aval, c'est plus de 50 % des rendements de riz et de coton qui peuvent être attribués à la fonte des glaciers et des neiges. Bien que la dépendance dans les plaines inondables du Gange soit comparativement plus faible, les eaux de fonte demeurent primordiales pendant la saison sèche, en particulier pour les cultures tels le riz et la canne à sucre. D'après les données recueillies entre 1981 et 2010, 129 millions d'agriculteurs des bassins de l'Indus et du Gange dépendent essentiellement de la fonte des glaciers et des neiges pour assurer leur subsistance. L'eau ainsi fournie est suffisante pour permettre la culture d'aliments servant à nourrir 38 millions de personnes environ.

Source : Biemans et al. (2019).

• • •

Les catastrophes naturelles liées au changement climatique provoquent l'exode des populations, avec des conséquences négatives indirectes sur la main-d'œuvre agricole

L'aggravation des risques naturels (tels les précipitations erratiques et abondantes, les inondations, les sécheresses et les glissements de terrain) perturbe la stabilité de l'approvisionnement et du transport des produits agricoles dans les régions montagneuses reculées, et accroît de fait l'insécurité alimentaire. Les catastrophes naturelles liées au changement climatique provoquent l'exode des populations, avec des conséquences négatives indirectes sur la main-d'œuvre agricole, comme le montrent les cas du Ghana, de la Thaïlande, de la République-Unie de Tanzanie et la région himalayenne de l'Hindou Kouch. Entre 2003 et 2013, dans les pays en développement, 25 % des aléas climatiques ont touché le secteur agricole et causé 80 % des dommages et des pertes relatifs au bétail et aux cultures dans les régions montagneuses (Romeo et al., 2020).

3.2.3 Des défis supplémentaires

L'accès aux marchés d'alimentation

Pour les petits exploitants agricoles, disposer d'une sécurité alimentaire et la conserver repose sur la capacité à vendre leurs produits, à avoir accès aux marchés et à y commercer (Romeo et al., 2020). Or, le temps de transport jusqu'aux marchés peut accroître la vulnérabilité des populations rurales, étant donné qu'il restreint leur accès à des sources d'alimentation alternatives et leur capacité à faire face aux pénuries alimentaires. Le transport jusqu'aux marchés peut être entravé par l'état des routes, la topologie, la navigabilité des rivières, l'état des cours d'eau et d'autres obstacles naturels.

L'accès aux infrastructures et aux services

L'éducation, l'état de santé, le genre, les biens et les dépenses, de même que les conditions régionales telle l'existence d'infrastructures, de marchés et d'institutions compétentes, comptent parmi les facteurs qui influent sur la sécurité alimentaire des foyers. En raison de niveaux de revenus relativement faibles et d'un manque de soutien et de ressources externes, les communautés de montagne vivant dans des zones reculées disposent souvent de moyens limités pour mettre en place des mesures d'adaptation face aux crises et aux situations d'urgence (Romeo et al., 2020).

La dégradation des terres et la déforestation

En montagne, la dégradation des terres nuit à la productivité agricole, compromet la durabilité de la production agricole et de l'élevage tout comme elle menace la sûreté de l'approvisionnement en eau (CLD, 1994). Dans de nombreux pays en développement, les pratiques agricoles non durables contribuent fortement à la dégradation des sols. Dans les

cas où l'expansion agricole est forte, la déforestation altère la régulation des flux hydriques vers les nappes phréatiques et les cours d'eau, exacerbant l'érosion des sols et aggravant les risques de glissements de terrain et d'inondations (FAO/PNUD, 2023).

Dangers

Au cours des dernières décennies, la fréquence et la gravité des dangers et des catastrophes naturelles en montagne ont augmenté. Les inondations, les coulées de débris, les glissements de terrain et les avalanches comptent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et qui touchent le plus grand nombre de personnes dans les régions montagneuses. Toutes ont des effets néfastes sur les activités agricoles des petits exploitants et sur la sécurité alimentaire (Adler et al., 2022). En outre, la prévalence de ces risques influe également sur les migrations et la disponibilité de main-d'œuvre agricole (Hock et al., 2019).

3.3 Réagir

Les mesures visant à lutter contre les effets du changement climatique dans les régions montagneuses diffèrent considérablement en termes d'objectifs et de priorités. La rapidité de leur mise en œuvre, les dispositifs de gouvernance, les modalités de prise de décision et l'ampleur des ressources financières et autres allouées à leur mise en œuvre varient également (Adler et al., 2022). Le plus souvent, les mesures d'adaptation comprennent la modification des pratiques agricoles, le développement des infrastructures, notamment aux fins du stockage de l'eau, le recours aux savoirs autochtones, le renforcement des capacités au niveau local et l'adaptation écosystémique (McDowell et al., 2021).

Pour l'essentiel, les mesures d'adaptation étudiées sont largement progressives et portent principalement sur les systèmes d'alerte précoce et la diversification des stratégies de subsistance pour l'agriculture et l'élevage à petite échelle. Toutefois, rares sont les données qui attestent de l'applicabilité et de l'efficacité à long terme de telles mesures pour faire face aux impacts du changement climatique ainsi qu'aux pertes et dommages qui en découlent (Hock et al., 2019 ; Adler et al., 2022).

3.3.1 Méthodes d'adaptation au changement climatique en montagne

L'agriculture irriguée

L'amélioration des infrastructures de stockage de l'eau (sous forme liquide) permet d'atténuer efficacement les pénuries d'eau, en particulier pendant la saison sèche. Le type et la taille des installations de stockage peuvent varier en fonction des spécificités hydrologiques du site et des matériaux disponibles. Le plus souvent, les infrastructures de stockage de l'eau en montagne comprennent des étangs, des réservoirs, des barrages de correction et des bassins. Ces systèmes de stockage offrent un approvisionnement en eau viable en complément des systèmes d'irrigation dans les régions montagneuses (Viviroli et al., 2011 ; Hock et al., 2019 ; Adler et al., 2022).

Au nombre des méthodes d'adaptation des systèmes d'irrigation, on recense l'adoption de nouvelles technologies et infrastructures d'irrigation, ou la modernisation des infrastructures existantes, l'adoption de mesures de conservation de l'eau, le rationnement de l'eau au sein des systèmes de distribution, l'amélioration de l'efficacité et la modification des modes de culture. Ces méthodes peuvent toutes être promulguées par les associations d'usagers présentes dans les régions montagneuses (encadré 3.4) (Nüsser et al., 2019 ; Rasul et al., 2019 ; Rosa, 2022). Elles constituent des mesures d'adaptation efficaces et à moindres frais (McDowell et al., 2019 ; Adler et al., 2022).

Encadré 3.4 Mesures innovantes d'adaptation à la fonte des glaciers compromettant la disponibilité de l'eau pour l'agriculture irriguée

Au Ladakh, dans le nord de l'Inde, le stockage de la glace est une pratique ancienne qui permet de fournir de l'eau pendant la saison des cultures (Hasnain, 2012). Afin de pallier le manque d'eau saisonnier aux périodes critiques pour l'irrigation, les villageois de la région ont mis au point quatre types de réservoirs de glace : des bassins, des cascades, des dérivations et un type de glacier artificiel connu sous le nom de « stupas de glace ». En automne et en hiver, ces réservoirs captent l'eau qui gèle ensuite et la retiennent jusqu'au printemps, période à laquelle elle fond et s'écoule vers les champs (Clouse et al., 2017 ; Nüsser et al., 2019). Ils conservent une partie du débit annuel jusqu'alors inutilisée et permettent son usage complémentaire au printemps suivant.

Cette stratégie d'adaptation permet notamment d'augmenter la fréquence d'irrigation, les rendements, l'humidité des sols et la recharge des nappes phréatiques. Toutefois, des doutes subsistent quant à son efficacité sur le long terme, étant donné que son fonctionnement dépend du ruissellement hivernal et des cycles de gel et de dégel, tous deux sensibles aux variations météorologiques annuelles. Elle soulève également les questions des coûts financiers et des exigences en main-d'œuvre, qui varient selon les quatre types de réservoirs de glace.



Stupas de glace au Ladakh en Inde

Photographie : © Naveen Macro/Shutterstock*.

Source : adapté de Hock et al. (2019, encadré 2.3, p. 156).

L'agriculture pluviale

Les agriculteurs de montagne qui pratiquent l'agriculture pluviale ont appris à s'adapter aux variations de précipitations et de disponibilité de l'eau de diverses manières. Ils ont notamment choisi d'adopter des pratiques agricoles en harmonie avec le climat, de diversifier leurs cultures, d'opter pour des cultures résistantes à la sécheresse, de protéger les sols, de mettre en place des systèmes de collecte de l'eau, de construire des étangs de collecte, d'élaborer des systèmes d'alerte précoce en cas de sécheresse et d'appliquer les savoirs autochtones (Adhikari, 2018 ; Adler et al., 2022).

• • •

Les peuples autochtones qui vivent dans les montagnes disposent de savoirs précieux, qui leur ont permis de se doter de systèmes alimentaires durables, d'assurer la gestion des terres et de préserver la biodiversité

L'élevage

Les mesures d'adaptation en matière d'élevage comprennent le déplacement saisonnier des troupeaux vers des pâturages plus fertiles ainsi que l'utilisation de programme d'assurance du bétail quand ils existent (Fassio et al., 2014 ; Gentle et Thwaites, 2016 ; Tiwari et al., 2020).

La pêche en eau douce

Les gestionnaires peuvent se baser sur les niveaux de priorité des lacs et sur les stratégies spécifiques aux écosystèmes pour décider où et quand il leur faut appliquer des mesures de gestion des pêcheries. Il s'agit notamment de recourir au rempoissonnement traditionnel, de prévenir la perte d'habitat aquatique, de lutter contre les espèces invasives et de modifier les pratiques de pêche (FAO, 2003 ; Tingley et al., 2019).

La gestion des bassins hydrographiques

Adopter des approches de gestion des bassins hydrographiques qui tiennent compte des besoins agricoles en eau et qui englobent à la fois les sols, la biodiversité, la sylviculture et les écosystèmes renforcera la résilience générale aux effets du changement climatique, et notamment à la fonte de la cryosphère (Adler et al., 2022 ; FAO, 2023). Dans ce contexte, le reboisement constitue un usage durable des terres qui favorise la rétention de l'eau dans les sols et les bassins versants en augmentant la disponibilité de l'eau pour l'agriculture. Les sols de montagne sont particulièrement vulnérables et sensibles aux processus de dégradation tels l'érosion hydrique et l'appauvrissement chimique et physique (FAO, 2015b).

Risques

Dans les régions montagneuses, la plupart des mesures d'adaptation aux risques naturels sont prises en réaction à des situations climatiques spécifiques ou s'inscrivent dans des plans de relèvement après une catastrophe (McDowell et al., 2019). Les mesures structurelles en dur telle la construction de digues, de barrages, de réservoirs et de remblais sont largement employées pour limiter les risques de même que les systèmes d'alerte précoce, le zonage et la gestion des terres (Adler et al., 2022). Parmi les mesures recommandées, l'adaptation fondée sur les écosystèmes permet d'atténuer les risques de glissements de terrain (par le boisement, le reboisement et la gestion forestière améliorée), d'inondations (par la restauration et la renaturation des cours d'eau) et de sécheresses (par l'adaptation des bassins hydrographiques) (FAO, 2023). Au Népal, l'introduction de l'agroforesterie dans l'agriculture de montagne a favorisé la réduction des risques de catastrophe naturelle (Schick et al., 2018).

3.3.2 Savoirs et capacités

Les réseaux de surveillance hydrologique font cruellement défaut au sein des régions montagneuses, en particulier dans les pays en développement. Faute de collecte de données hydrologiques et d'activités de surveillance suffisantes, quand elles existent, il est très difficile d'anticiper la prévision des risques et de réaliser des évaluations hydrologiques précises pour la gestion de l'eau et la production agricole (Wilby, 2019 ; GEO Mountains, 2022). Ce pourquoi il est urgent de procéder à des évaluations hydrologiques dans de nombreuses chaînes de montagnes du monde. Cela inclut la région himalayenne de l'Hindou Kouch, où les eaux de montagne assurent la subsistance agricole de plus de 2 milliards de personnes tout en répondant à leurs besoins en eau et en énergie (Immerzeel et al., 2010 ; Wester et al., 2019). Un autre moyen d'améliorer la surveillance hydrologique en montagne consiste à faire appel aux sciences participatives. Faire participer les populations locales à la recherche et à la compilation de données (Njue et al., 2019) peut fournir l'occasion de collecter des données et d'impliquer le public dans des projets liés à l'eau (Hegarty et al., 2021).

Les peuples autochtones qui vivent dans les montagnes disposent de savoirs, de traditions et de pratiques culturelles propres, uniques et précieux, qui leur ont permis de se doter de systèmes alimentaires durables, d'assurer la gestion des terres et de préserver la biodiversité (FAO, 2021). Dans les Andes par exemple, les savoirs autochtones ont favorisé l'accès aux réseaux locaux et régionaux d'approvisionnement en semences ainsi que l'adoption de nouvelles variétés de cultures (Skarbø et Van der Molen, 2014) (encadré 3.5).

3.3.3 La gouvernance

Le Partenariat de la montagne est la seule structure de gouvernance mondiale dédiée aux régions montagneuses. Créée par l'Organisation des Nations Unies en 2002, cette alliance regroupe, à titre volontaire, des gouvernements, des organisations intergouvernementales, des organisations non gouvernementales ainsi que des collectivités locales. Par la collaboration, le partage des savoirs et la sensibilisation, le Partenariat de la montagne relève les défis auxquels sont confrontés les milieux et les communautés de montagne, notamment en matière de sécurité alimentaire et de nutrition.

Encadré 3.5 Le réseau international de systèmes participatifs de garantie (SPG) en montagne

Le réseau international [de systèmes participatifs de garantie (SPG) en montagne] est encore un exemple valable d'un partage des savoirs entre les peuples montagnards, y compris les communautés autochtones. Créé en 2019 par treize organisations de petits producteurs de montagne issus de l'État plurinational de Bolivie, d'Inde, du Kirghizistan, de Mongolie, du Népal, du Panama, du Pérou et des Philippines, le Réseau SPG en montagne est le premier réseau international de systèmes de garantie participatifs. [...] Le réseau met en contact des petits exploitants agricoles travaillant partout dans le monde, promeut un partage horizontal des savoirs et une coopération innovante sud-sud. Grâce à ce réseau, les expériences des agriculteurs montagnards peuvent être partagées, diffusées et développées tout en gardant une approche adaptée au contexte, typique des initiatives SPG.

Source : extrait de FAO (2021, p. 100).

Cette approche collaborative de la gouvernance permet aux différentes parties prenantes de travailler ensemble à un objectif commun : un avenir prospère pour les régions montagneuses et leurs habitants. Étant l'agence de référence pour les montagnes au sein du système des Nations Unies, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) héberge le secrétariat du Partenariat de la montagne, l'agriculture et la production alimentaire occupant une place centrale dans la vie des régions montagneuses. Suite à la proclamation des Cinq années d'action pour le développement dans les régions montagneuses (2023-2027), un cadre a été mis en place pour regrouper et orienter les activités relatives au développement durable des régions montagneuses. En outre, le Partenariat de la montagne est en charge d'une initiative présentée lors de la Conférence des Nations Unies de 2023 consacrée à l'examen approfondi à mi-parcours de la réalisation des objectifs de la Décennie internationale d'action sur le thème « L'eau et le développement durable » (2018-2028), initiative intitulée « Faire progresser le développement durable des montagnes et protéger les "châteaux d'eau" de la planète ».

Au niveau régional, plusieurs organisations relèvent des défis spécifiques à leur région et tentent d'y apporter des solutions (voir chapitre 9). À titre d'exemple, la Convention alpine et la Convention des Carpates concentrent leurs efforts sur le développement durable et la conservation au sein des montagnes européennes des Alpes et des Carpates respectivement (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2017). De même,

dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch, le Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD) promeut la coopération et le partage de connaissances entre pays. Enfin, le Consortium pour le développement durable de l'écorégion andine (CONDESAN) travaille sur le développement durable dans la cordillère des Andes, en mettant l'accent sur les initiatives communautaires ainsi que sur l'échange de savoirs entre les nations andines.

3.4 Conclusions

L'agriculture de montagne doit surmonter de nombreux défis pour permettre la sécurité alimentaire des populations grâce à une production durable et améliorée. Le changement climatique, qui affecte la variabilité des précipitations, ainsi que le réchauffement de la planète, entraîne la fonte des glaciers et des neiges, compromettant de plus en plus la disponibilité de l'eau en montagne sur différentes échelles temporelles, posant des problèmes aussi bien aux agriculteurs des montagnes qu'à ceux qui pratiquent l'agriculture irriguée en aval. Outre l'éloignement et les difficultés d'accès qui caractérisent les régions montagneuses, il faudra composer avec les effets du changement climatique qui affectent les différents aspects de la sécurité alimentaire que sont la disponibilité, l'accessibilité, l'utilisation et la stabilité.

Générer un environnement propice à la mise en œuvre de mesures d'adaptation passe notamment par le renforcement des capacités et de l'organisation des savoirs, y compris l'intensification de la surveillance hydrologique et de la collecte de données, par l'élaboration de programmes et de politiques agricoles qui tiennent pleinement compte des besoins spécifiques des communautés de montagne, par le renforcement des institutions de gouvernance locale, y compris les associations d'agriculteurs, par le soutien aux méthodes d'agriculture de montagne qui préservent la diversité agricole et par la mise à disposition de financements suffisants pour implémenter lesdites mesures.

Plus que jamais, il importe de mettre en place une gouvernance efficace pour assurer la sécurité alimentaire des régions montagneuses et des terres de plus basse altitude. Il est indispensable de s'assurer que les montagnes fournissent suffisamment d'eau pour l'irrigation des basses terres mais aussi pour préserver et mettre en valeur des paysages agricoles de montagne, qui sont à la fois riches en diversité et uniques en leur genre.

Références

Adhikari, S. 2018. « Drought impact and adaptation strategies in the mid-hill farming system of western Nepal ». *Water*, vol. 5, n° 9, article 101. doi.org/10.3390/environments5090101.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Minternbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.002.

Alpiev, M., Sarieva, M., Siriwardena, S. N., Valbo-Jørgensen, J. et Woynárovich, A. 2013. *Fish Species Introductions in the Kyrgyz Republic*. FAO Document technique sur les pêches et l'aquaculture n° 584. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/4/i3268e/i3268e.pdf.

Biemans, H., Siderius, C., Lutz, A. F., Nepal, S., Ahmad, B., Hassan, T., Von Bloh, W., Wijngaard, R. R., Wester, P., Shrestha, A. B. et Immerzeel, W. W. 2019. « Importance of snow and glacier meltwater for agriculture on the Indo-Gangetic Plain ». *Nature Sustainability*, vol. 2, p. 594 à 601. doi.org/10.1038/s41893-019-0305-3.

Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A. et Gómez López, R. J. 2011. « Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru ». *Climatic Change*, vol. 105, p. 179 à 206. doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1.

Chapagain, T. et Raizada, M. N. 2017. « Agronomic challenges and opportunities for smallholder terrace agriculture in developing countries ». *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, article 331. doi.org/10.3389/fpls.2017.00331.

CLD (Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification). 1994. *Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique*. Paris, CLD. catalogue.unccd.int/936_UNCCD_Convention_fre.pdf.

Clouse, C., Anderson, N. et Shippling, T. 2017. « Ladakh's artificial glaciers: Climate-adaptive design for water scarcity ». *Climate and Development*, vol. 9, n° 5, p. 428 à 438. doi.org/10.1080/17565529.2016.1167664.

Deng, C., Zhang, G., Liu, Y., Nie, X., Li, Z., Liu, J. et Zhu, D. 2021. « Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review ». *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 9, n° 3, p. 344 à 359. doi.org/10.1016/j.iowcr.2021.03.002.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 1996. *Déclaration de Rome sur la sécurité alimentaire mondiale*. Sommet mondial de l'alimentation, 13-17 novembre 1996. Rome, FAO. www.fao.org/4/W3613F/W3613F00.htm.

—. 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Rome, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.

—. 2014. *Développer des chaînes de valeur alimentaires durables : Principes directeurs*. Rome, FAO. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bbdbeaed-d4da-45b6-9012-c30db2aeb7bf/content.

—. 2015a. *Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils 2015*. Rome, FAO. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8d557f4f-9458-4140-8f6b-42c9309ed060/content.

—. 2015b. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Rome, FAO. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fc51a31f-4d11-45da-a9f3-5d44277ab231/content.

—. 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/ca5561en.pdf.

—. 2021. *Le Livre Blanc/Wiphala sur les systèmes alimentaires des peuples autochtones*. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cb4932fr.

—. 2022. *L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde – Des systèmes au bord de la rupture*. Rapport principal. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cb7654fr.

—. 2023. *Building Resilience into Watersheds: A Sourcebook*. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cc3258en.

—. 2024. « Systèmes ingénieux du patrimoine agricole mondial (SIPAM). Les SIPAM dans le monde ». Site web de la FAO. www.fao.org/giahs/giahsaroundtheworld/fr (consulté le 6 novembre 2024).

FAO/PNU (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Rome/Nairobi, FAO/PNU. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fassio, G., Battaglini, L. M., Porcellana, V. et Viazzo, P. P. 2014. « The role of the family in mountain pastoralism: Change and continuity ». *Mountain Research and Development*, vol. 34, n° 4, p. 336 à 343. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00019.1.

Gentle, P. et Maraseni, T. N. 2012. « Climate change, poverty and livelihoods: Adaptation practices by rural mountain communities in Nepal ». *Environmental Science and Policy*, vol. 21, p. 24 à 34. doi.org/10.1016/j.envsci.2012.03.007.

Gentle, P. et Thwaites, R. 2016. « Transhumant pastoralism in the context of socioeconomic and climate change in the mountains of Nepal ». *Mountain Research Development*, vol. 36, n° 2, p. 173 à 182. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00011.1.

GEO Mountains. 2022. *Mountain Observations: Monitoring, Data, and Information for Science, Policy, and Society*. Note d'orientation. GEO Mountains. geomountains.org/images/GEO_Mountains_Policy_Brief_IYSMD_2022.pdf.

Groupe de la Banque mondiale. s.d. « Qu'est-ce que la sécurité alimentaire ? » Site web du Groupe de la Banque mondiale. www.banquemonde.org/fr/topic/agriculture/brief/food-security-update/what-is-food-security (consulté le 2 octobre 2024).

Hasnain, M. 2012. *Artificial Glaciers in Ladakh: A Socio-Economic Analysis*. Geres India. www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/Artifial-glaciers-Socio-economic-analysis.pdf.

Hegarty, S., Hayes, A., Regan, F., Bishop, I. et Clinton, R. 2021. « Using citizen science to understand river water quality while filling data gaps to meet United Nations Sustainable Development Goal 6 objectives ». *Science of the Total Environment*, vol. 783, article 146953. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146953.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. et Steltzer, H. 2019. « High mountain areas ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Minternbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 131 à 202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Immerzeel, W. W., Van Beek, L. P. H. et Bierkens, M. F. P. 2010. « Climate change will affect the Asian water towers ». *Science*, vol. 328, n° 5984, p. 1382 à 1385. doi.org/10.1126/science.1183188.

Ingty, T. 2017. « High mountain communities and climate change: Adaptation, traditional ecological knowledge, and institutions ». *Climatic Change*, vol. 145, nos 1 et 2, p. 41 à 55. doi.org/10.1007/s10584-017-2080-3.

Joshi, S., Jasra, W. A., Ismail, M., Shrestha, R. M., Yi, S. L. et Wu, N. 2013. « Herders' perceptions of and responses to climate change in northern Pakistan ». *Environmental Management*, vol. 52, n° 3, p. 639 à 648. doi.org/10.1007/s00267-013-0062-4.

Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Siderius, C., Wijngaard, R. R., Nepal, S., Shrestha, A. B., Wester, P. et Biemans, H. 2022. « South Asian agriculture increasingly dependent on meltwater and groundwater ». *Nature Climate Change*, vol. 12, p. 566 à 573. doi.org/10.1038/s41558-022-01355-z.

Mallory, C. D. et Boyce, M. S. 2018. « Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer ». *Environmental Reviews*, vol. 26, n° 1, p. 13 à 25. doi.org/10.1139/er-2017-0032.

McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F. M., Cramer, K. et Ricciardi, V. 2019. « Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? ». *Global Environmental Change*, vol. 54, p. 19 à 30. doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012.

McDowell, G., Stevens, M., Lesnikowski, A., Huggel, C., Harden, A., Di Bella, J., Morecroft, M., Kumar, P., Joe, E. T., Bhatt, I. D. et Global Adaptation Mapping Initiative. 2021. « Closing the adaptation gap in mountains ». *Mountain Research and Development*, vol. 41, n° 3, p. A1 à A10. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00033.1.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Fürreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Gislason, G. M., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. et Brown, L. E. 2017. « Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n° 37, p. 9770 à 9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

Molden, D. J., Shrestha, A. B., Immerzeel, W. W., Maharjan, A., Rasul, G., Wester, P., Wagle, N., Pradhananga, S. et Nepal, S. 2022. « The great glacier and snow-dependent rivers of Asia and climate change: Heading for troubled waters ». A. K. Biswas et C. Tortajada (éds), *Water Security Under Climate Change*. Collection Water Resources Development and Management. Singapore, Springer, p. 223 à 250. doi.org/10.1007/978-981-16-5493-0_12.

Namgay, K., Millar, J. E., Black, R. S. et Samdup, T. 2014. « Changes in transhumant agro-pastoralism in Bhutan: A disappearing livelihood? ». *Human Ecology*, vol. 42, p. 779 à 792. doi.org/10.1007/s10745-014-9684-2.

Nie, Y., Pritchard, H. D., Liu, Q., Hennig, T., Wang, W., Wang, X., Liu, S., Nepal, S., Samyn, D., Hewitt, K. et Chen, X. 2021. « Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram ». *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 2, p. 91 à 106. doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w.

Njue, N., Stenfert Kroese, J., Gräf, J., Jacobs, S. R., Weeser, B., Breuer, L. et Rufino, M. C. 2019. « Citizen science in hydrological monitoring and ecosystem services management: State of the art and future prospects ». *Science of the Total Environment*, vol. 693, article 133531. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.337.

Nüsser, M. et Schmidt, S. 2017. « Nanga Parbat revisited: Evolution and dynamics of sociohydrological interactions in the Northwestern Himalaya ». *Annals of the American Association of Geographers*, vol. 107, n° 2, p. 403 à 415. doi.org/10.1080/24694452.2016.1235495.

Nüsser, M., Dame, J., Kraus, B., Baghel, R. et Schmidt, S. 2019. « Socio-hydrology of "artificial glaciers" in Ladakh, India: Assessing adaptive strategies in a changing cryosphere ». *Regional Environmental Changes*, vol. 19, p. 1327 à 1337. doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0.

Nyima, Y. et Hopping, K. A. 2019. « Tibetan lake expansion from a pastoral perspective: Local observations and coping strategies for a changing environment ». *Society and Natural Resources*, vol. 32, n° 9, p. 965 à 982. doi.org/10.1080/08941920.2019.1590667.

Petr, T. et Swar, S. B. (éds). 2002. *Cold Water Fisheries in the Trans-Himalayan Countries*. Document technique de la FAO sur les pêches n° 431. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). <https://openknowledge.fao.org/items/11b2bd1d-b9ef-49f1-9543-d59f3c7c064>.

Rasul, G. et Molden, D. 2019. « The global social and economic consequences of mountain cryospheric change ». *Frontiers in Environmental Science*, vol. 7, article 91. doi.org/10.3389/fenvs.2019.00091.

Rasul, G., Pasakhala, B., Mishra, A. et Pant, S. 2019. « Adaptation to mountain cryosphere change: Issues and challenges ». *Climate and Development*, vol. 12, n° 4, p. 297 à 309. doi.org/10.1080/17565529.2019.1617099.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. et Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Romeo, R., Manuelli, S. R., Geringer, M. et Barchiesi, V. (éds). 2021. *Systèmes agricoles de montagne – Semences pour l'avenir : Pratiques agricoles durables pour des moyens de subsistance résilients en montagne* (en anglais). Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). www.fao.org/agroecology/database/detail/fr/c/1434582/.

Rosa, L. 2022. « Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: Biophysical potentials and feedbacks ». *Environmental Research Letters*, vol. 17, n° 6, article 063008. doi.org/10.1088/1748-9326/ac7408.

Schick, A., Wieners, E., Schwab, N. et Schickhoff, U. 2018. « Sustainable disaster risk reduction in mountain agriculture: Agroforestry experiences in Kaule, mid-hills of Nepal ». S. Mal, R. Singh, C. Huggel (éds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Cham, Suisse, Springer, p. 249 à 264. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_17.

Secrétariat permanent de la Convention alpine. 2017. *Convention alpine. Plateforme Agriculture de montagne : Agriculture de montagne*. Signaux alpins 8. Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/AS/AS8_FR.pdf.

Shaoliang, Y., Ismail, M. et Zhaoli, Y. 2012. « Pastoral communities' perspectives on climate change and their adaptation strategies in the Hindu Kush-Karakoram-Himalaya ». H. Kreutzmann (éd.), *Pastoral Practices in High Asia: Agency of 'Development' Effected by Modernisation, Resettlement and Transformation*. Collection Avances in Asian Human-Environmental Research. Dordrecht, Pays-Bas (Royaume des), Springer. doi.org/10.1007/978-94-007-3846-1_17.

Sheehy, D. P., Miller, D. et Johnson, D. A. 2006. « Transformation des systèmes de production animale dans les steppes tibétaines ». *Sécheresse*, vol. 17, n° 1 à 2, p. 142 à 151. www.researchgate.net/publication/228762262_Transformation_of_traditional_pastoral_livestock_systems_on_the_Tibetan_steppe.

Skarbø, K. et Van der Molen, K. 2014. « Irrigation access and vulnerability to climate-induced hydrological change in the Ecuadorian Andes ». *Culture, Agriculture, Food and Environment*, vol. 36, n° 1, p. 28 à 44. doi.org/10.1111/cuag.12027.

Smadja, J., Aubriot, O., Puschiasis, O., Duplan, T., Grimaldi, G., Hugonnet, M. et Buchheit, P. 2015. « Climate change and water resources in the Himalayas: Field study in four geographic units of the Koshi basin, Nepal ». *Journal of Alpine Research*, vol. 103, n° 2. doi.org/10.4000/rga.2910.

Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. et Shannon, P. D. 2019. « Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries ». *Lake and Reservoir Management*, vol. 35, n° 4, p. 435 à 452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.

Tiwari, K. R., Sitaula, B. K., Bajracharya, R. M., Raut, N., Bhusal, P. et Sengel, M. 2020. « Vulnerability of pastoralism: A case study from the high mountains of Nepal ». *Sustainability*, vol. 12, n° 7, article 2737. doi.org/10.3390/su12072737.

Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., López-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M. et Woods, R. 2011. « Climate change and mountain water resources: Overview and recommendations for research, management and policy ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 15, n° 2, p. 471 à 504. doi.org/10.5194/hess-15-471-2011.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. et Wada, Y. 2020. « Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources ». *Nature Sustainability*, vol. 3, p. 917 à 928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. et Shrestha, A. B. (éds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suisse, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

Wilby, R. L. 2019. « A global hydrology research agenda fit for the 2030s ». *Hydrology Research*, vol. 50, n° 6, p. 1464 à 1480. doi.org/10.2166/nh.2019.100.

Xenarios, S., Shenhav, R., Abdullaev, I. et Mastellari, A. 2018. « Current and future challenges of water security in Central Asia ». *Global Water Security: Lessons Learnt and Long-Term Implications*. Collection Water Resources Development and Management. Singapore, Springer, p. 117 à 142. doi.org/10.1007/978-981-10-7913-9_5.

Yang, L., Liu, M., Lun, F., Yuan, Z., Zhang, Y. et Min, Q. 2017. « An analysis on crops choice and its driving factors in agricultural heritage systems: A case of Honghe Hani rice terraces system ». *Sustainability*, vol. 9, n° 7, article 1162. doi.org/10.3390/su9071162.

Young, G., Zavala, H., Wandel, J., Smit, B., Salas, S., Jiménez, E., Fiebig, M., Espinoza, R., Díaz, H. et Cepeda, J. 2010. « Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile ». *Climatic Change*, vol. 98, p. 245 à 276. doi.org/10.1007/s10584-009-9665-4.

Chapitre 4

Établissements humains et réduction des risques de catastrophes

ONU-Habitat

Hezekiah Pireh, Avi Sarkar, Sudha Shrestha et Shobana Srinivasan

**Avec les contributions de Nidhi Nagabhatla (UNU-CRIS),
Sanae Okamoto et Serdar Turkeli (UNU-MERIT), Dipesh Chapagain
et Navneet Kumar (UNU-EHS), Narayan Singh Khawas,
Chicgoua Noubactep, Darren Saywell et Sean Furey (RWSN)**

Les régions montagneuses constituent de véritables châteaux d'eau qui permettent la persistance d'établissements humains où logent 14 % de la population mondiale (Ehrlich et al., 2021). Elles sont toutefois confrontées à certains problèmes particuliers qui ont un impact sur la fourniture de services d'approvisionnement en eau, d'assainissement et d'hygiène (WASH) (De Jong, 2015 ; Clerici et al., 2019 ; Zogaris et al., 2021). Elles sont souvent exposées aux risques de catastrophes naturelles tels les inondations, les glissements de terrain provoqués par des précipitations extrêmes, les coulées de débris, les avalanches de glace et de neige, les tremblements de terre ainsi que les sécheresses.

Le présent chapitre traite des défis posés à la fourniture de services WASH et à la réduction des risques de catastrophe naturelle dans les régions montagneuses ainsi que des solutions qui y sont apportées. Il met en évidence les conséquences d'une urbanisation rapide et incontrôlée, des risques naturels et du changement climatique sur la disponibilité, la qualité et la sûreté des ressources en eau dans ces régions.

4.1 Défis

4.1.1 L'urbanisation

Dans les régions montagneuses, l'urbanisation rapide et incontrôlée exerce une pression sur des écosystèmes montagneux fragiles, compromettant la disponibilité, la qualité et la sûreté des ressources en eau. Malgré les problèmes que posent le relief difficile et la fragilité des écosystèmes, ces régions n'ont cessé d'être de plus en plus peuplées. Entre 1975 et 2015, la population d'environ 35 % des sous-régions montagneuses a été multipliée par deux au minimum (Thornton et al., 2022). Au cours de la même période, la proportion de personnes vivant en zones urbaines dans ces régions est passée de 6 % à 39 % (Ehrlich et al., 2021 ; Thornton et al., 2022).

Comprendre les modes d'expansion urbaine propres aux villes de montagne apparaît dès lors essentiel si l'on veut assurer une planification durable, notamment pour les ressources en eau (Jia et al., 2020). Les régions montagneuses abritent environ 1,1 milliard de personnes. Bien que le taux d'urbanisation varie considérablement d'une chaîne de montagnes à l'autre, environ 34 % de la population de ces régions vit dans des villes, 31 % dans des petites villes et des zones à densité modérée, et 35 % en zones rurales. Même si les taux d'urbanisation en montagne (66 %) sont moindres que ceux des basses terres (78 %), les chaînes de montagnes les plus peuplées et les plus urbanisées telles que l'Himalaya, les Andes, les Rocheuses et les Alpes sont également celles où les taux d'urbanisation sont les plus élevés (Ehrlich et al., 2021).

Or, l'urbanisation des régions montagneuses n'est pas sans conséquences majeures sur l'écoulement des eaux de surface et des eaux souterraines (Somers et McKenzie, 2020) ainsi que sur la qualité de l'eau (De Jong, 2015). Elle modifie considérablement le cycle de l'eau et ce faisant, change le volume et la qualité des eaux de surface disponibles. Les pentes raides, l'altération des processus naturels d'écoulement des eaux et les surfaces bitumées diminuent la recharge des nappes phréatiques et augmentent les ruissellements, ce qui favorise les crues soudaines et l'érosion des sols. En ce qui concerne la qualité de l'eau, elle diminue du fait des polluants provenant de l'accroissement du tourisme, des eaux usées non traitées et de l'industrie. Certains polluants anciens tels les polluants organiques persistants, en particulier les polychlorobiphényles et le dichlorodiphényltrichloréthane, les hydrocarbures aromatiques polycycliques et les métaux lourds, peuvent contaminer les sources d'eau sous l'effet de la fonte des glaces et des neiges associée au changement climatique (Hodson, 2014).

À titre d'exemple, on peut mentionner la région de l'Himalaya, en Asie du Sud, une région densément peuplée qui a connu une croissance urbaine rapide au cours des dernières décennies. Si l'urbanisation de la région a incontestablement créé des emplois et amélioré les infrastructures, elle a également engendré d'importants problèmes d'ordre environnemental et socio-économique. Les perturbations des régimes hydrologiques

• • •

Dans les régions montagneuses, l'urbanisation rapide et incontrôlée exerce une pression sur des écosystèmes montagneux fragiles

Encadré 4.1 Conséquences des inondations de 2021 au Népal

Le 15 juin 2021, la ville de Melamchi Bazar au Népal a été frappée par une crue éclair dévastatrice des rivières Melamchi et Indravati. Le bilan s'est élevé à cinq morts ; vingt personnes ont disparu et les dégâts ont été considérables. Le projet d'approvisionnement en eau potable de Melamchi a également été perturbé. Cet événement faisait partie d'une série d'inondations qui, en l'espace de trois à quatre jours, ont détruit 337 maisons et contraint 525 familles à quitter leur foyer. Des infrastructures essentielles, notamment treize ponts suspendus, sept ponts carrossables et de nombreuses routes, ont été détruites, avec des conséquences importantes sur les établissements humains, l'agriculture et les moyens de subsistance tributaires des cours d'eau sur une vaste zone.

Les inondations ont également entraîné de nombreux débris provenant de zones en amont et les ont déplacés sur 54 km jusqu'à Dolalghat. À cela s'ajoute un glissement de terrain qui, le 18 juin 2021, a bloqué la rivière Tamakoshi, formant un lac menaçant d'inonder les zones situées en aval. Après avoir dressé un premier bilan des victimes et des dégâts, l'Autorité nationale de réduction et de gestion des risques de catastrophe naturelle a souligné l'urgence d'une gestion efficace de ces risques.

Source : Maharjan et al. (2021).

ont entraîné une diminution de la recharge des nappes phréatiques et de la disponibilité de l'eau, exacerbant l'insécurité hydrique dans un contexte marqué par les effets du changement climatique. Parallèlement, les déforestations, les pertes de biodiversité et la probabilité de catastrophes naturelles comme les inondations et les glissements de terrain se sont multipliées (Tiwari et al., 2018). L'expansion urbaine a dégradé des écosystèmes fragiles, notamment les forêts, les habitats des espèces sauvages et les sources d'eau. Face à ces défis, il est nécessaire de trouver des solutions fondées sur la nature et de mettre en place des plans d'urbanisme spécifiques aux régions montagneuses à même de garantir le développement durable et la résilience.

4.1.2 Les risques naturels

En montagne, les risques naturels tels les glissements de terrain, les tremblements de terre, les inondations, les vidanges brutales de lac glaciaire et les avalanches sont nombreux (voir section 2.2.3). Ces phénomènes peuvent endommager les infrastructures d'approvisionnement en eau et d'assainissement mais aussi perturber l'accès aux services WASH. Ainsi, entre 850 et 2022, 3 151 incidents liés à des vidanges brutales de lac glaciaire ont été recensés dans les principales régions glaciaires du monde (Lützow et al., 2023). Tous ont causé des dommages considérables aux infrastructures essentielles telles que les routes, les ponts, les barrages, les structures de prise d'eau et de protection contre les inondations, les centrales hydroélectriques et les lignes électriques ainsi que les réseaux de communication. Ces risques accentuent la vulnérabilité de communautés déjà fragiles et souvent marginalisées, et déstabilisent certains secteurs dont celles-ci tirent leur subsistance comme l'agriculture, le tourisme et la biodiversité (Alfthan et al., 2018 ; Hock et al., 2019).

Au Népal, par exemple, le tremblement de terre survenu en avril 2015 a endommagé les installations d'approvisionnement en eau et d'assainissement alentour : « Sur un total de 11 288 systèmes d'approvisionnement en eau dans les quatorze districts les plus touchés, 1 570 ont subi des dommages importants, 3 663 ont été partiellement endommagés et environ 220 000 toilettes ont été partiellement ou totalement détruites » (ONU-Habitat, 2016, p. 4). On trouvera un autre exemple dans l'encadré 4.1, qui met en évidence les conséquences des inondations qui ont frappé le Népal en 2021.

4.1.3 Le changement climatique

Les habitats de montagne sont particulièrement sensibles au changement climatique. La fréquence, la gravité et l'intensité accrues des phénomènes météorologiques extrêmes peuvent entraîner une détérioration des conditions de vie et compromettre l'accès aux services d'approvisionnement en eau et d'assainissement (qui sont souvent précaires). Dans les régions montagneuses, la disponibilité de l'eau peut, en outre, être affectée par la hausse des températures et l'évolution des régimes de précipitations dues au changement climatique du fait d'une plus forte exposition aux risques, telles les sécheresses et les inondations (Adler et al., 2022).

Avec l'augmentation de l'intensité, de la fréquence et de la durée des précipitations extrêmes, le débit de pointe des cours d'eau risque d'augmenter brusquement et de déclencher des crues soudaines dans les vallées fluviales. Au Népal, une augmentation d'une unité de mesure des précipitations maximales sur une journée a entraîné une hausse de 33 % des décès liés aux inondations tandis qu'une augmentation d'une unité de mesure du nombre de jours de fortes

• • •

Les déforestations, les pertes de biodiversité et la probabilité de catastrophes naturelles comme les inondations et les glissements de terrain se sont multipliées

pluies et de journées humides consécutives a entraîné une hausse des décès liés aux glissements de terrain de 45 % et 34 % respectivement (Chapagain et al., 2024). À l'inverse, un déficit de précipitations, résultant notamment d'une diminution du nombre de jours de pluie de faible intensité, épars ou consécutifs, réduit la percolation souterraine de l'eau dans les zones escarpées. La recharge des nappes phréatiques en est affectée négativement et par conséquent, le débit de base des cours d'eau, des sources naturelles et des réservoirs aquifères diminue (Chapagain et al., 2021 ; Seneviratne et al., 2021).

Dans les régions d'altitude, l'accentuation du stress hydrique provoque des migrations et des déplacements de population (Joshi et Dongol, 2018 ; Almulhim et al., 2024). Lors des saisons sèches et chaudes, le manque d'eau détériore les pratiques d'hygiène et augmente le risque de prévalence des maladies (Dhimal et al., 2015 ; Bhandari et al., 2020). En outre, la pollution liée à un manque d'assainissement, l'épuisement des sources d'eau, les incendies de forêt, l'exploitation minière et l'agriculture non durable peuvent avoir une incidence sur la disponibilité et la qualité de l'eau.

Au fur et à mesure que les températures planétaires augmentent, les régions pour lesquelles le manteau neigeux des montagnes constitue des réserves d'eau temporaires peuvent également connaître de graves sécheresses (Seneviratne et al., 2021).

4.1.4 Le terrain montagneux

Avec ses pentes raides, ses conditions climatiques souvent difficiles, son éloignement et ses réseaux routiers limités, le terrain montagneux pose de lourdes contraintes sur la construction et l'entretien des infrastructures d'approvisionnement en eau et d'assainissement. La topographie des régions montagneuses favorise la présence naturelle ou la construction de réservoirs d'eau à haute altitude ainsi que de systèmes d'adduction d'eau par gravité, qui fonctionnent sans coûts énergétiques élevés. Cependant, la construction et l'entretien des réservoirs d'eau, des stations d'épuration et des réseaux de canalisation peuvent se révéler complexes et onéreux. Pour les communautés qui ne bénéficient pas de l'eau courante, les pentes raides et les terrains rocheux restreignent également la disponibilité des eaux de surface, ce qui rend la collecte de l'eau longue et physiquement éprouvante, en particulier pour les femmes et les filles qui sont traditionnellement les premières responsables de l'approvisionnement en eau au niveau des foyers (Shrestha et al., 2019).

4.1.5 La santé mentale et le bien-être psychosocial

Dans les régions montagneuses, les phénomènes météorologiques extrêmes peuvent avoir des répercussions notables sur la santé des personnes, non seulement en termes de blessures physiques (Sumann et al., 2020) mais aussi relativement à la santé mentale et au bien-être psychosocial (Poudyal et al., 2021). Les communautés de la région himalayenne de l'Hindou Kouch, qui ont souffert des effets du changement climatique, en particulier au cours des dernières années, en sont un exemple. De même, les populations du district de Ghizer, dans la région de Gilgit-Baltisan, dans le nord du Pakistan, ont été victimes de crues éclair et de glissements de terrain qui ont détruit, sur leur passage, les infrastructures locales, les terres agricoles et les habitations (Abbas et Khan, 2020).

De nombreuses communautés de montagne dont la subsistance repose sur l'agriculture, le tourisme ou la sylviculture sont vulnérables aux effets des phénomènes météorologiques extrêmes. Si elles perdent les moyens de gagner leur vie en raison de mauvaises récoltes ou de dommages causés aux infrastructures et aux activités touristiques, elles risquent alors de sombrer dans la précarité. De toute évidence, ces situations ont un coût pour l'état psychique des communautés locales. De telles expériences peuvent provoquer du stress, de l'anxiété et des troubles de stress post-traumatique chez les personnes touchées (OMS, 2022).

• • •

Il est essentiel d'investir dans des infrastructures résilientes au climat et dans des stratégies d'adaptation communautaires

4.2 Actions

Par crainte de la stigmatisation sociale associée à ces affections, les populations peuvent se montrer réticentes à aborder ouvertement les problèmes de santé mentale (Ebrahim, 2022). De plus, les conditions météorologiques extrêmes peuvent isoler les communautés en perturbant leurs trajets ainsi que les réseaux de communication avec, pour conséquence, un accès limité, voire inexistant, aux services de santé et de santé mentale (Dewi et al., 2023). Le fait que l'accès à ces services soit déjà difficile en temps normal en raison de l'éloignement géographique ou d'une pénurie de professionnels qualifiés n'arrange pas les choses.

Si l'on veut améliorer l'accès aux services WASH et renforcer la réduction des risques de catastrophe naturelle (RRC) dans les régions montagneuses, il faut faire de l'eau, une priorité dans la planification urbaine de même qu'intégrer les services WASH et la RRC dans les contributions déterminées au niveau national (CDN) et les plans nationaux d'adaptation (PNA). Il est essentiel d'investir dans des infrastructures résilientes au climat et dans des stratégies d'adaptation communautaires, y compris les savoirs locaux. Par ailleurs, il importe de favoriser la coopération transfrontière afin de renforcer la résilience et d'atténuer les impacts des phénomènes climatiques extrêmes.

4.2.1 Planification urbaine et aménagement du territoire

Une meilleure anticipation de l'urbanisation dans les régions montagneuses est possible dès lors que l'on place les services WASH au centre de la planification urbaine et de l'aménagement du territoire. À cet égard, il convient d'élaborer et de mettre en œuvre des politiques efficaces d'aménagement du territoire urbain afin de protéger et conserver les environnements urbains et les services écosystémiques ainsi que pour rendre les systèmes urbains résilients au climat (Tiwari et al., 2018).

Dans les Alpes, par exemple, la mise en place de pratiques de gestion durable des terres, notamment le reboisement et le pâturage contrôlé, a permis de réduire l'érosion des sols et d'améliorer la rétention de l'eau. Les projets de gestion des sols et de reboisement s'inscrivent dans une volonté de stabiliser les pentes et d'accroître l'infiltration de l'eau de pluie et de fonte des neiges de manière à favoriser la recharge des nappes phréatiques et à atténuer le risque de crues soudaines (Repe et al., 2020).

4.2.2 Gestion de la réduction des risques de catastrophe naturelle

Dans les régions montagneuses, la RRC exige de conjuguer des mesures d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ses effets, une planification stratégique de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, l'emploi de solutions techniques et la création de systèmes d'alerte précoce.

Dans le cadre du programme Nepal Karnali Water Activity, des donateurs, telle l'Agence des États-Unis pour le développement international (USAID), ont eu recours à des modèles hydrologiques comme l'outil d'évaluation *Soil & Water Assessment Tool* et *Water Accounting+* pour estimer l'utilisation et la disponibilité des ressources en eau dans le bassin de la rivière Karnali. Ces évaluations permettent d'orienter les plans de gestion de la RRC au niveau local comme des stratégies d'atténuation et d'adaptation telles que l'aménagement d'étangs, la protection des sources d'eau, le reboisement ou encore l'identification de cultures résistantes aux inondations et à la sécheresse.

Afin de réduire au minimum les vulnérabilités, notamment sur les services WASH, il est essentiel d'intégrer les efforts de lutte contre le changement climatique et de prendre des décisions fondées en matière d'urbanisme. La recherche collaborative et l'élaboration conjointe de politiques jouent un rôle crucial pour faire face aux défis propres aux régions

• • •
Les communautés des régions montagneuses n'ont cessé d'avoir besoin des savoirs autochtones pour faire face aux problèmes relatifs à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement

montagneuses et protéger les services écosystémiques vitaux qu'elles fournissent. Il existe à cet égard des initiatives qui, comme le programme Global Mountain Safeguard Research et le Partenariat de la montagne, visent à accompagner les communautés de montagne vers la durabilité et la résilience, à garantir le bien-être socio-économique tout en préservant les écosystèmes de montagne (FAO, 2022 ; UNU-EHS, 2023).

4.2.3 Financer l'adaptation au changement climatique comme des infrastructures résilientes

L'examen des contributions déterminées au niveau national (CDN)¹² et des plans nationaux d'adaptation (PNA)¹³, soumis dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) avant juin 2024, montre que, dans les pays en développement montagneux, les services WASH et la gestion des catastrophes naturelles constituent des secteurs prioritaires. Les mesures d'adaptation applicables aux régions montagneuses comprennent, par exemple, des études de faisabilité portant sur la construction d'infrastructures de stockage d'urgence, de dérivation et de contrôle des rejets des lacs glaciaires, la gestion des bassins fluviaux et la planification de leur optimisation, la surveillance des mouvements des glaciers et la mise en place de systèmes de réduction des risques de vidange brutale des lacs glaciaires et d'alerte précoce au sein des bassins fluviaux glaciaires.

Le montant nécessaire pour financer l'adaptation au changement climatique dans les pays en développement montagneux s'élève à 187 milliards de dollars EU par an (avec les prix de 2021), soit 1,3 % du produit intérieur brut de ceux-ci pour la décennie en cours. Les besoins de financement au titre de l'adaptation au changement climatique dans les secteurs de la santé et de l'assainissement, de la distribution d'eau et de la RRC représentent près de 20 % des sommes nécessaires. Toutefois, les versements de financements publics internationaux en vue de l'adaptation dans ces pays n'ont été que de 13,8 milliards de dollars EU en 2022, ce qui révèle un déficit de financement très important (voir chapitre 9), y compris dans les secteurs de l'approvisionnement en eau, de la RRC, de la santé et de l'assainissement dans les régions montagneuses. Même si ces déficits de financement demeurent abyssaux, ces secteurs représentent à eux tous près de 30 % des financements actuels reçus pour l'adaptation au changement climatique dans les pays en développement montagneux (PNUE, 2024).

Les infrastructures résilientes au climat, tels les digues renforcées et les canaux de dérivation des crues, peuvent protéger les communautés de montagne et les usagers en aval contre les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes et l'instabilité des processus hydrologiques. Selon le Rapport *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (GIEC, 2022), la conception des projets d'infrastructure peut être adaptée à l'augmentation des ruissellements dus à la fonte des neiges et des glaces afin de garantir la continuité de l'approvisionnement en eau pour les usages urbains et agricoles.

Le cas des montagnes Rocheuses illustre l'importance de bien connaître les flux d'eau saisonniers (débits d'été, d'automne et d'hiver) aux fins de concevoir des interventions efficaces pour les services d'eau (Rood, 2008 ; GIEC, 2022).

À court terme, le coût de la mise en place d'infrastructures résilientes au climat dépasse généralement celui des technologies conventionnelles. Le surcoût peut s'avérer prohibitif et freiner l'implantation de technologies appropriées. On ne saurait attendre des marchés financiers qu'ils absorbent à eux seuls ce surcoût et les États doivent donc y pourvoir, au moins jusqu'à ce qu'une masse critique soit atteinte et que le coût de la

¹² unfccc.int/NDCREG (en anglais).

¹³ napcentral.org/submitted-NAPs (en anglais).

• • •
Les systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement décentralisés peuvent être particulièrement avantageux dans les régions montagneuses

technologie puisse être abaissé. Les fournisseurs de services peuvent également avoir besoin de financements pour développer de nouvelles solutions technologiques tout en maintenant leur viabilité financière.

4.2.4 Promouvoir des stratégies et des initiatives participatives et communautaires

Les communautés des régions montagneuses n'ont cessé d'avoir besoin des savoirs autochtones pour faire face aux problèmes relatifs à l'approvisionnement en eau et à l'assainissement. Les progrès dans le domaine du génie civil ont facilité l'application de ces savoirs à travers la construction de systèmes modulaires tels les réservoirs et les citernes pour le stockage de l'eau. L'installation d'infrastructures de collecte des eaux de pluie dans des endroits où l'eau potable est rare peut également bénéficier aux communautés de montagne.

Grâce à l'emploi de stratégies d'adaptation communautaires, qui tiennent notamment compte du point de vue des peuples autochtones, il est possible de donner aux collectivités locales les moyens de participer aux décisions relatives à la gestion de l'eau et d'intégrer les savoirs locaux et traditionnels dans la conception et la mise en œuvre de solutions adaptées à leurs besoins spécifiques.

4.2.5 La gestion intégrée des ressources en eau

L'adaptation du concept de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) aux contextes locaux des régions montagneuses peut contribuer à répondre à certains enjeux hydriques tels que l'impact de l'évolution du manteau neigeux et du recul des glaciers sur la disponibilité de l'eau (voir encadré 2.2). Ainsi, en améliorant les capacités de stockage de l'eau par la construction de nouveaux réservoirs et le rétablissement de systèmes traditionnels de stockage de l'eau, dont étangs et réservoirs, on peut contribuer à atténuer les effets de la variabilité hydrique saisonnière et les conséquences des crues éclair. Les innovations technologiques telles que la surveillance efficace des glaciers et les systèmes d'alerte précoce (voir chapitre 8), susceptibles de fournir des informations essentielles sur la fonte des glaciers et les glissements de terrain, doivent également être envisagés (Taylor et al., 2023).

Dans certains pays andins, des systèmes de GIRE ont été mis en place pour surveiller le recul des glaciers et la formation de lacs glaciaires, permettant d'envoyer des alertes précoces aux habitants, de réduire le risque de crues soudaines et de protéger des vies comme les infrastructures WASH. Dans l'État plurinational de Bolivie et au Pérou notamment, des évaluations des dangers et des risques liés à la vidange brutale de lac glaciaire sont menées au niveau national afin de s'assurer que la sûreté de l'eau — dont la distribution de l'eau — peut être un objet de préoccupation en même temps que les effets du changement climatique (Emmer et al., 2022).

4.2.6 Installer des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement décentralisés

Les systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement décentralisés peuvent être particulièrement avantageux dans les régions montagneuses (voir encadré 4.2), étant donné qu'ils permettent de réduire les risques d'endommagement des infrastructures à la suite de catastrophes naturelles sur des terrains accidentés, propices à des glissements fréquents. Dans les régions montagneuses de la République démocratique populaire lao et du Népal notamment, des initiatives communautaires ont permis de mettre en place des solutions résilientes et durables en matière d'approvisionnement en eau et d'assainissement, démontrant la probité des approches décentralisées au sein d'environnements naturels difficiles (UICN, s.d.).

Encadré 4.2 Un système d'approvisionnement en eau et d'assainissement par gravité au niveau communautaire

Dans le quartier de Xieng Ngeun, à Luang Prabang, en République démocratique populaire lao, 85 % des foyers n'avaient pas accès à des services d'assainissement de base, les infrastructures étant hors d'usage en raison d'un manque d'entretien. Par conséquent, les villageois devaient souvent parcourir de longues distances pour aller chercher de l'eau, une eau qui était souvent contaminée et à l'origine de problèmes de santé généralisés tels que la diarrhée.

Afin de résoudre ce problème, typique des régions montagneuses (pentes raides, éloignement et faible densité de population), le Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat) a mis en œuvre un projet pilote de services WASH au niveau communautaire, ciblant 1 221 foyers répartis dans six villages. L'un des éléments clés du projet consistait à créer un système d'adduction d'eau par gravité, lequel s'appuyait sur le relief local pour fournir de l'eau régulièrement sans avoir recours à des systèmes de pompage gourmands en énergie. Grâce à ce système ainsi qu'à des fonds d'avances renouvelables destinés à l'amélioration des infrastructures sanitaires gérées de façon collective, plus de 90 % des foyers des villages cibles ont été raccordés au réseau de distribution d'eau alors qu'aucun n'y était raccordé auparavant. L'accent a été mis sur le processus participatif, notamment à travers la formation des habitants à la protection et à l'entretien de l'infrastructure de distribution d'eau.

Le projet a également permis de relever plusieurs problèmes persistants. Par exemple, l'absence d'un système de drainage approprié constituait un souci majeur pour les habitants des zones de basse altitude sujettes aux inondations. De plus, la faible densité de population empêchait jusqu'alors toute tentative de réaliser des économies d'échelle dans la fourniture de services WASH, rendant encore plus difficile de justifier la dépense de coûts de construction et d'entretien d'infrastructures étendues à des zones aussi peu peuplées sur un terrain aussi accidenté.

Aujourd'hui, alors que plus de 80 % des foyers ont été raccordés au réseau de distribution d'eau et que plus de 90 % ont accès à des services d'assainissement de base, le projet pilote de Xieng Ngeun a prouvé les potentialités des approches communautaires pour relever les défis uniques de la fourniture de services d'approvisionnement en eau dans les régions montagneuses.

Source : ONU-Habitat (s.d.).

4.3 Conclusions

La fréquence et l'intensité croissantes des phénomènes climatiques extrêmes, tels les glissements de terrain, les inondations et les crues éclair, sont autant de facteurs aggravants les problèmes complexes auxquels sont confrontés les établissements humains dans les régions montagneuses, en particulier en ce qui concerne la gestion des ressources en eau, les services WASH, la RRC et la santé des populations. S'il est certes nécessaire d'évaluer l'ampleur des perturbations sur les services WASH, il convient de noter que l'implication des communautés locales a permis de faciliter la réduction des risques de santé publique dans les régions montagneuses vulnérables.

Les actions visant à améliorer l'accès aux services WASH et le renforcement de la RRC incluent notamment de donner la priorité à l'eau dans la planification urbaine et l'aménagement du territoire, d'accorder une place centrale aux services WASH et au renforcement de la RRC dans les CDN et les PNA, d'investir dans des infrastructures résilientes d'un point de vue climatique et de promouvoir des stratégies d'adaptation à l'échelle communautaire, qui reconnaissent et intègrent les savoirs locaux et autochtones. Parallèlement, l'adaptation du concept de GIRE aux contextes locaux peut permettre d'aborder certains problèmes, tel l'impact du recul des glaciers sur la disponibilité de l'eau. La coopération transfrontière et le renforcement des mesures de RRC peuvent également contribuer à atténuer les impacts des phénomènes extrêmes.

Les défis auxquels il faut faire face exigent des actions politiques concertées pour lesquelles la GIRE constitue un cadre adapté car elle donne une place centrale à l'équilibre entre besoins sociaux, besoins économiques et besoins écologiques en intégrant les savoirs traditionnels et les technologies modernes. En cas de catastrophe naturelle, le recours à des systèmes décentralisés de distribution d'eau et d'assainissement peut aussi renforcer la résilience et réduire les dommages causés aux infrastructures. Ces systèmes permettent aux communautés locales d'assurer leur autonomie grâce au renforcement des capacités et à des approches participatives tout comme ils garantissent que les stratégies WASH sont pertinentes par rapport aux usages et cultures locales, ce qui est crucial si l'on veut que l'adaptation au changement climatique soit réelle et que les services sanitaires fonctionnent bien dans les environnements de haute altitude.

Le présent chapitre préconise également des investissements dans des infrastructures résilientes aux conditions hydriques et climatiques, tels les digues renforcées et les canaux de dérivation des crues, ainsi que l'application de solutions fondées sur la nature. Enfin, les stratégies de lutte contre le changement climatique et de sécurisation des approvisionnements en eau au sein des communautés vulnérables de haute altitude doivent intégrer des services sanitaires, notamment des systèmes d'aide en santé mentale.

Références

Abbas, S. et Khan, A. 2020. « Socioeconomic impacts of natural disasters: Implication for flood risk measurement in Damas Valley, District Ghizer, Gilgit-Baltistan, Pakistan ». *Pakistan Geographical Review*, vol. 75, n° 1, p. 71 à 83. www.researchgate.net/publication/343098654.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mittenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. et Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report*. Nairobi/Vienne/Arendal, Norvège, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)/Centre GRID-Arendal. gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s/_document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.

Almulhim, A. I., Alverio, G. N., Sharifi, A., Shaw, R., Huq, S., Mahmud, M. J., Ahmad, S. et Abubakar, I. R. 2024. « Climate-induced migration in the Global South: An in depth analysis ». *npj Climate Action*, vol. 3, article 47. doi.org/10.1038/s44168-024-00133-1.

Bhandari, D., Bi, P., Sherchand, J. B., Dhimal, M. et Hanson-Easey, S. 2020. « Assessing the effect of climate factors on childhood diarrhoea burden in Kathmandu, Nepal ». *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 223, n° 1, p. 199 à 206. doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.09.002.

Chapagain, D., Bharati, L., Mechler, R., Samir, K. C., Pflug, G. et Borgemeister, C. 2024. « Understanding the role of climate change in disaster mortality: Empirical evidence from Nepal ». *Climate Risk Management*, vol. 46, article 100669. doi.org/10.1016/j.crm.2024.100669.

Chapagain, D., Dhaubanjar, S. et Bharati, L. 2021. « Unpacking future climate extremes and their sectoral implications in western Nepal ». *Climatic Change*, vol. 168, article 8. doi.org/10.1007/s10584-021-03216-8.

Clerici, N., Cote-Navarro, F., Escobedo, F. J., Rubiano, K. et Villegas, J. C. 2019. « Spatio-temporal and cumulative effects of land use-land cover and climate change on two ecosystem services in the Colombian Andes ». *Science of the Total Environment*, vol. 685, p. 1181 à 1192. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.275.

De Jong, C. 2015. « Challenges for mountain hydrology in the third millennium ». *Frontiers in Environmental Science*, vol. 3. doi.org/10.3389/fenvs.2015.00038.

Dewi, S. P., Kasim, R., Sutarsa, I. N., Hunter, A. et Dykgraaf, S. H. 2023. « Effects of climate-related risks and extreme events on health outcomes and health utilization of primary care in rural and remote areas: A scoping review ». *Family Practice*, vol. 40, n° 3, p. 486 à 497. doi.org/10.1093/fampra/cmac151.

Dhimal, M., Ahrens, B. et Kuch, U. 2015. « Climate change and spatiotemporal distributions of vector-borne diseases in Nepal: A systematic synthesis of literature ». *PLoS ONE*, vol. 10, article e0129869. doi.org/10.1371/journal.pone.0129869.

Ebrahim, Z. 2022. « Climate Disasters Trigger Mental Health Crisis in Pakistan's Mountains ». Site web de *Dialogue Earth*. dialogue.earth/en/climate/climate-disasters-trigger-mental-health-crisis-in-pakistans-mountains/.

Ehrlich, D., Melchiorri, M. et Capitani, C. 2021. « Population Trends and Urbanisation in Mountain Ranges of the World ». *Land*, vol. 10, n° 3, article 255. doi.org/10.3390/land10030255.

Emmer, A., Wood, J. L., Cook, S. J., Harrison, S., Wilson, R., Díaz-Moreno, A., Reynolds, J. M., Torres, J. C., Yarleque, C., Mergili, M., Jara, H. W., Bennett, G., Caballero, A., Glasser, N. F., Melgarejo, E., Riveros, C., Shannon, S., Turpo, E., Tinoco, T., Torres, L., Garay, D., Villafane, H., Garrido, H., Martínez, C., Apaza, N., Araujo, J. et Poma, C. 2022. « 160 glacial lake outburst floods (GLOFs) across the Tropical Andes since the Little Ice Age ». *Global and Planetary Change*, vol. 208, article 103722. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103722.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 2022. « Vision and Mission ». Site web du Partenariat de la montagne. <https://www.fao.org/mountain-partnership/about/vision-and-mission/en>.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds)]. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Morin, S., Orlove, B. et Steltzer, H. 2019. « High mountain areas » H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 131 à 202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

Hodson, A. J. 2014. « Understanding the dynamics of black carbon and associated contaminants in glacial systems ». *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, vol. 1, n° 2, p. 141 à 149. doi.org/10.1002/wat2.1016.

Jia, L., Ma, Q., Du, C., Hu, G. et Shang, C. 2020. « Rapid urbanization in a mountainous landscape: Patterns, drivers, and planning implications ». *Landscape Ecology*, vol. 35, p. 2449 à 2469. doi.org/10.1007/s10980-020-01056-y.

Joshi, N. et Dongol, R. 2018. « Severity of climate induced drought and its impact on migration: A study of Ramechhap District, Nepal ». *Tropical Agricultural Research*, vol. 29, n° 2, p. 194 à 211.

Lützow, N., Veh, G. et Korup, O. 2023. « A global database of historic glacier lake outburst floods ». *Earth System Science Data*, vol. 15, n° 7, p. 2983 à 3000. doi.org/10.5194/essd-15-2983-2023.

Maharjan, S. B., Steiner, J. F., Shrestha, A. B., Maharjan, A., Nepal, S., Shrestha, M. S., Bajracharya, B., Rasul, G., Shrestha, M., Jackson, M. et Gupta, N. 2021. *The Melamchi Flood Disaster. Cascading Hazard and the Need for Multihazard Risk Management*. Katmandou, Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD). lib.icimod.org/record/35284.

OMS (Organisation mondiale de la Santé). 2022. *Mental Health and Climate Change: Policy Brief*. OMS. iris.who.int/handle/10665/354104.

ONU-Habitat (Programme des Nations Unies pour les établissements humains). 2016. *Nepal Earthquake 2015: Reviving Sanitation Campaign. Global Sanitation Fund Lessons*. Katmandou, ONU-Habitat. unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-05/gsf-021-eq-final.pdf.

—. s.d. *Projet communautaire d'eau et d'assainissement à Xieng Ngeun dans la province Luang Prabang, RDP Lao. Initiative pour l'eau et l'assainissement dans la région du Mékong (MEK-WATSAN)*. ONU-Habitat. unhabitat.la/projects/community-based-wash-project-xieng-ngeun/.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2024. *Adaptation Gap Report 2024. Come Hell and High Water: As Fires and Floods Hit the Poor Hardest, it is Time for the World to Step Up Adaptation Actions*. Nairobi, PNUE. doi.org/10.59117/20.500.11822/46497.

Poudyal, N. C., Joshi, O., Hodges, D. G., Bhandari, H. et Bhattacharai, P. 2021. « Climate change, risk perception, and protection motivation among high-altitude residents of the Mt. Everest region in Nepal ». *Ambio*, vol. 50, p. 505 à 518. doi.org/10.1007/s13280-020-01369-x.

Repe, A. N., Poljanec, A. et Vrščaj, B. (éds). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Ljubljana, Programme Interreg Espace alpin. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.

Rood, S. B., Pan, J., Gill, K. M., Franks, C. G., Samuelson, G. M. et Shepherd, A. 2008. « Declining summer flows of Rocky Mountain rivers: Changing seasonal hydrology and probable impacts on floodplain forests ». *Journal of Hydrology*, vol. 349, n° 3 et 4, p. 397 à 410. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.012.

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M. et Zhou, B. 2021. « Weather and climate extreme events in a changing climate ». V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, J. B. R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T. K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell et N. Caud (éds), *Changement climatique 2021: les bases scientifiques physiques*. Contribution du Groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 1513 à 1766. doi.org/10.1017/9781009157896.013.

Shrestha, S., Chapagain, P. S. et Ghimire, M. 2019. « Gender Perspective on Water Use and Management in the Context of Climate Change: A Case Study of Melamchi Watershed Area, Nepal ». *Sage Open*, vol. 9, n° 1. doi.org/10.1177/2158244018823078.

Somers, L. D. et McKenzie, J. M. 2020. « A review of groundwater in high mountain environments ». *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Water*, vol. 7, n° 6, article e1475. doi.org/10.1002/wat2.1475.

Sumann, G., Moens, D., Brink, B., Brodmann Maeder, M., Greene, M., Jacob, M., Koirala, P., Zafren, K., Ayala, M., Musi, M., Oshiro, K., Sheets, A., Strapazzon, G., Macias, D. et Paal, P. 2020. « Multiple trauma management in mountain environments: A scoping review ». *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, vol. 28, article 117. doi.org/10.1186/s13049-020-00790-1.

Taylor, C., Robinson, T. R., Dunning, S., Carr, J. R. et Westoby, M. 2023. « Glacial lake outburst floods threaten millions globally ». *Nature Communications*, vol. 14, article 487. doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Vivioli, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. et Adler, C. 2022. « Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls ». *PLoS ONE*, vol. 17, n° 7, article e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tiwari, P. C., Tiwari, A. et Joshi, B. 2018. « Urban growth in Himalaya: Understanding the process and options for sustainable development ». *Journal of Urban and Regional Studies on Contemporary India*, vol. 4, n° 2, p. 15 à 27. core.ac.uk/download/pdf/222961854.pdf.

IUCN (Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources). s.d. « Nepal ». Site web de l'IUCN. iucn.org/our-work/region/asia/countries/Nepal.

UNU-EHS (Institut pour l'environnement et la sécurité humaine de l'UNU). 2023. « 5 Insights Towards Systemic Risk Reduction in Mountains ». Site web de l'UNU-EHS, 9 octobre 2023. unu.edu/ehs/series/5-insights-towards-systemic-risk-reduction-mountains.

Zogaris, S., Jayasinghe, A. D., Sanjaya, K., Vlami, V., Vavalidis, T., Grapci-Kotori, L. et Vanhove, M. P. M. 2021. « Chapter 4 – Water management impacts on mountain rivers: Insights from tropical, subtropical and Mediterranean-climate basins ». E. Dimitriou et C. Papadaki (éds), *Environmental Water Requirements in Mountainous Areas*. Elsevier, p. 155 à 200. doi.org/10.1016/B978-0-12-819342-6.00004-X.

Chapitre 5

Industrie et énergie

ONUDI

Jon Marco Church

Avec les contributions de John Payne et Christian Susan (ONUDI)

• • •

Les industries consommatrices d'eau se sont développées dans les régions montagneuses car l'eau et d'autres ressources y sont relativement abondantes

Il semble paradoxal que les secteurs de l'industrie et de l'énergie soient à la fois responsables et victimes du changement climatique qui affecte les régions montagneuses et la cryosphère. Des données datant du milieu du XIX^e siècle montrent un recul soudain des glaciers en raison d'un forçage radiatif causé « par l'augmentation des dépôts de carbone noir industriel sur la neige » (voir encadré 2.1), en particulier en Europe occidentale (Sigl et al., 2018, p. 50 ; Beard et al., 2022a ; 2022b). Ce recul est exacerbé par le réchauffement climatique.

Ce chapitre montre que les usages de l'eau par le secteur de l'industrie et de l'énergie dans les zones montagneuses peuvent être adaptés aux changements rapides touchant la cryosphère en raison de la fonte des glaciers et de la diminution de la couverture neigeuse (GIEC, 2019), ainsi que les répercussions que ceci implique sur les eaux de surface et souterraines.

Tout comme le secteur de l'industrie et de l'énergie revêt une importance particulière pour l'eau et les glaciers dans les régions montagneuses, l'eau est également importante pour l'industrie et l'énergie. Les industries consommatrices d'eau se sont développées dans les régions montagneuses car l'eau et d'autres ressources y sont relativement abondantes (Perlik, 2019 ; Modica, 2022), ce qui a contribué à leur industrialisation (Collantes, 2009). De fait, les régions montagneuses situées en Europe emploient en général relativement plus de personnes dans le secteur industriel que les régions de plaine ne le font (Nordregio, 2004). En Amérique latine, on estime que 85 % de l'énergie hydroélectrique produite dans les pays andins est produite en montagne (Partenariat de la montagne, 2014). La fabrication d'eau minérale en bouteille y constitue une large industrie étant donné que cette eau est souvent extraite des régions montagneuses.

Outre de servir à la production industrielle et la production d'énergie – en particulier par les usines hydroélectriques mais aussi par les centrales à charbon et au bois –, l'eau sert également au traitement des minéraux, à la production de bois et au développement du tourisme en montagne (Talandier et Donsimoni, 2022). Elle est notamment nécessaire à la fabrication de la neige artificielle utilisée dans les stations de ski lorsque la neige naturelle vient à manquer ; le rafting et la voile sont aussi pratiqués sur l'eau. De même, l'eau s'avère indispensable à la pratique de la pêche récréative et dans le domaine de l'hôtellerie (FAO/ONU Tourisme, 2023). L'industrie et la production d'énergie ont des répercussions sur la quantité et la qualité des ressources en eau ainsi que sur la biodiversité aquatique, tout comme en a le changement climatique, par le fait qu'il provoque notamment la fonte des glaciers et du pergélisol de même que des modifications des limites les plus élevées des forêts et d'autres lignes de végétation (Zou et al., 2023).

Sur l'évolution des secteurs de l'industrie et de l'énergie à forte consommation d'eau dans les régions montagneuses, les données font défaut. Au fur et à mesure que les économies des pays en développement se développent, ces régions abandonnent aussi l'agriculture et les industries d'extraction de ressources naturelles en tant que principaux moteurs de croissance (Connor et Chaves Pacheco, 2024) et le secteur des services – dans lequel il convient d'inclure le tourisme, le commerce, l'éducation et les soins de santé – devient souvent le principal employeur.

En raison de l'expansion des industries gourmandes en eau à travers le monde, il est probable que les usages industriels de l'eau croissent également dans les régions montagneuses. Au niveau mondial notamment, l'extraction de matières premières pourrait augmenter, d'ici à 2060, de près de 60 % par rapport à 2020 (PNUE, 2024). En outre, l'importation d'eau virtuelle – soit les volumes d'eau inclus dans la fabrication et l'échange de produits et matériaux commercialisés – constitue un facteur de production important pour l'industrie de montagne.

Il ne faut pas sous-estimer l'eau qui retourne aux montagnes par le biais du commerce des biens et des services. Les régions montagneuses peuvent être des environnements contraints qui nécessitent d'importer davantage d'eau virtuelle qu'il en est exporté (Cabello et al., 2015 ; Malo-Larrea et al., 2022 ; Church, 2024).

5.1 Défis

Le secteur de l'industrie et de l'énergie se heurte à un autre défi de taille, à savoir l'altitude à laquelle il est possible d'opérer. Elle dépend en effet de l'inclinaison des versants mais aussi des températures puisque l'eau gelée n'est pas consommable ou utilisable directement. On recense toutefois des installations industrielles dans les zones glacées ainsi que dans les régions polaires, tels l'exploitation minière, le transport d'énergie, les infrastructures de télécommunications et certaines industries touristiques (Smith López et al., 2024). De telles conditions pouvant générer des coûts d'investissement et de fonctionnement considérables, les activités industrielles se limitent généralement à celles dont le retour sur investissement est élevé.

Le réchauffement climatique rend les investissements financiers plus risqués puisqu'il augmente les incertitudes et les probabilités de catastrophes naturelles en cascade – telles les vidanges brutales de lacs glaciaires, les avalanches, les coulées de boue et les inondations – ainsi que des risques technologiques – telle la défaillance des barrages de retenue et d'autres infrastructures (Tuihedur Rahman et al., 2024).

Ce sont principalement l'altitude, la latitude et la saison qui conditionnent l'augmentation des températures et la fonte des glaces. Avec les changements de la cryosphère change l'altitude à laquelle il est possible d'opérer étant donné que de plus en plus de montagnes perdent leurs glaciers et leur neige. La pluie et les eaux souterraines, y compris les aquifères karstiques, revêtent une importance particulière pour le secteur de l'industrie et de l'énergie. Les changements relatifs aux précipitations et à la perméabilité des sols dans les régions montagneuses représentent également un défi technique majeur.

La gestion d'une ressource souvent perçue comme abondante au niveau local n'est pas aisée. Les gens peuvent la considérer comme acquise, en particulier dans les régions alimentées par des glaciers (dont la fonte devrait toutefois s'accélérer avec le réchauffement climatique). Cela peut entraîner une surexploitation et un assèchement – en aval et dans les régions montagneuses (Orr et al., 2024). La sécheresse est souvent accentuée par le changement climatique et les modifications des régimes de précipitations.

Dépendant des économies et des marchés aux niveaux local, national et mondial, le décalage existant entre la disponibilité et les réserves hydriques locales d'un côté et, de l'autre, les usages de l'eau pour répondre à la demande des secteurs de l'industrie et de l'énergie représente le défi le plus grand. Il peut exister une demande de produits dont la fabrication nécessite beaucoup d'eau en période de pénurie d'eau, ce qui est susceptible d'entraîner des conflits au niveau local au sein des régions montagneuses ainsi qu'entre les communautés installées en amont et en aval (Füreder et al., 2018).

5.2 Impacts de la pollution industrielle sur la qualité de l'eau

Le développement des secteurs de l'industrie et de l'énergie peut compromettre la qualité des ressources en eau (figure 5.1). Dans les régions montagneuses isolées, il peut être de surcroît difficile d'appliquer une réglementation appropriée, ce qui diminue le contrôle des prélèvements d'eau et des rejets, y compris polluants (Machate et al., 2023). Le développement industriel et les friches industrielles altèrent le régime hydrique des sites et des écosystèmes liés à l'eau ; ils peuvent faciliter l'infiltration de polluants dans les nappes d'eaux de surface et souterraines (Modica, 2022).

La gestion des eaux usées industrielles représente parfois un problème majeur dans les régions montagneuses, où les dénivellations rendent la mise en place de systèmes de stockage, de traitement et de réutilisation des eaux et des déchets sur site plus complexes. Le manque de réglementation de certaines activités, telles l'exploitation minière et la pisciculture, peut causer d'importantes fuites de polluants, notamment de métaux lourds et de polluants organiques persistants tels les pesticides et les

• • •

Les communautés de montagne peuvent être vulnérables aux pollutions industrielles de l'eau

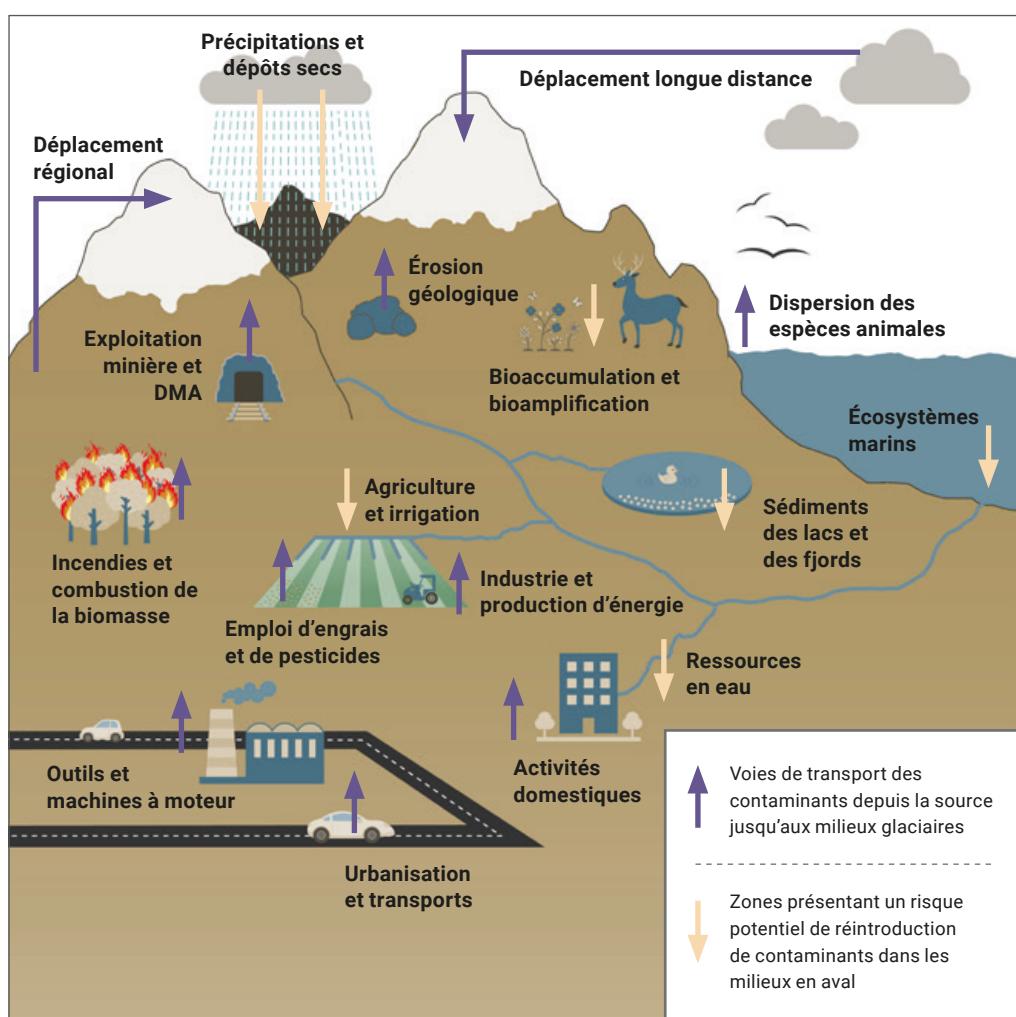
antibiotiques (Wright et al., 2011 ; ONUDI, 2017). Compte tenu des risques de catastrophes naturelles dans les régions montagneuses, la gestion des résidus miniers, y compris ceux de mines fermées, constitue un enjeu fondamental (Zoï Réseau environnemental, 2013 ; CEE, 2014).

Les communautés de montagne peuvent être vulnérables aux pollutions industrielles de l'eau. Le manque de régulation du développement industriel et énergétique peut avoir des effets néfastes sur les zones situées en amont comme celles situées en aval. En effet, ces dernières sont dépendantes des changements en amont et y sont plus vulnérables, même si les régions de plaine sont généralement plus riches et disposent de davantage de ressources en vue d'assurer leur résilience (Perlak, 2015). En outre, les relations entre communautés situées en amont et en aval peuvent subir les répercussions des dommages transfrontaliers et des accidents industriels impliquant l'eau (CEE, 2016).

Du fait de la migration de la main-d'œuvre vers des régions plus riches, les femmes, les enfants, les personnes âgées et handicapées sont souvent surreprésentés dans les communautés de montagne (Mishra, 2002). Cela signifie que la pollution industrielle affecte particulièrement ces groupes dans les régions montagneuses.

Figure 5.1

Voies de transport et processus de dépôt des contaminants au sein des environnements glaciaires



5.3

Exemples d'usages de l'eau par les secteurs de l'industrie et de l'énergie

• • •

Le développement rapide du minage de cryptomonnaies dans les zones montagneuses riches en eau constitue une menace pour le secteur de l'industrie et de l'énergie

L'usage de l'eau par les secteurs de l'industrie et de l'énergie peut être illustré par l'exemple de l'exploitation à grande échelle du lithium, impliqué dans la production de batteries et obtenu par des méthodes d'extraction par évaporation de la saumure de lithium dans la région couvrant le sud-ouest de l'État plurinational de Bolivie, le nord de l'Argentine et du Chili. Cette région concentre 56 % de l'ensemble des ressources en lithium connues dans le monde. Cette activité exerce un stress important sur les nappes d'eaux de surface et souterraines mais également sur les zones humides et les autres écosystèmes liés à l'eau de même que sur les communautés qui dépendent de ces eaux. L'extraction d'une tonne de lithium requiert environ deux mille mètres cube d'eau, dans une région caractérisée par un climat aride et de faibles précipitations (CEPALC, 2023).

L'exploitation minière artisanale à petite échelle peut également entraîner dénormes répercussions en amont et en aval. Par exemple, le recours au mercure dans l'extraction de l'or s'avère dangereux pour la qualité et la disponibilité de l'eau comme pour la santé publique (PNUE, 2012). Les associations locales et mouvements écologiques jouent un rôle fondamental dans la sensibilisation et la résolution de ces problèmes – comme le montre le cas de la mine d'or de Pascua-Lama (encadré 5.1).

En outre, le développement rapide du minage de cryptomonnaies dans les zones montagneuses riches en eau constitue une menace pour le secteur de l'industrie et de l'énergie. En effet, le « minage », étape clé de l'émission de cryptomonnaies, mobilise des dispositifs informatiques spéciaux qui requièrent de vastes quantités d'énergie bon marché. Le charbon constitue la principale source d'énergie employée, à hauteur de 45 % des besoins, et l'hydroélectricité, la principale source d'énergie renouvelable à hauteur de 16 % (Chamanara et Madani, 2023). Toutes deux sont souvent produites dans des régions montagneuses, ce qui a des répercussions considérables sur la quantité comme sur la qualité des ressources en eau (tableau 5.1) disponibles ainsi que sur les réseaux électriques. En Asie centrale, par exemple, plusieurs cryptomines opèrent dans les montagnes du Kazakhstan et du Kirghizistan, où l'électricité s'avère bon marché. La pression sur le réseau électrique s'en trouve accrue, au point d'avoir causé, en janvier 2022, un effondrement temporaire de l'ensemble du Réseau énergétique unifié d'Asie centrale, qui a provoqué une panne d'électricité géante pour des millions de personnes au sud du Kazakhstan, du Kirghizistan et de l'Ouzbékistan.

Tableau 5.1 Empreinte hydrique annuelle du minage de bitcoins dans le monde, 2020-2021

Pays	Empreinte hydrique (en million de m ³)	Empreinte hydrique (en million de m ³)
Chine	780,05	0,55
États-Unis d'Amérique	205,73	0,62
Canada	150,01	3,85
Kazakhstan	104,18	5,31
Fédération de Russie	94,11	0,65
Malaisie	64,57	1,90
Allemagne	51,94	0,62
Norvège	39,91	7,31
République islamique d'Iran	19,25	0,22
Thaïlande	17,98	0,25
Tous les autres pays	119,84	0,02

Sources : conçu par l'auteur à partir des données de Chamanara et Madani (2023, fig. 7, p. 17) et de la Division de statistique (s.d.).

La production de neige artificielle consomme beaucoup d'eau. Rien que dans les Alpes, on estime que 280 millions de m³ d'eau (Unbehaun et Pröbstl, 2006) et 2 100 gigawatts d'électricité (Hamberger et Doering, 2015) ont été utilisés pour ce faire. En 2009, la Convention alpine a signalé que « la production de neige artificielle compte pour 22 et 36 % des prélèvements d'eau annuels » dans deux stations de ski suisses et que « la production de neige artificielle peut entraîner en conflit avec d'autres usages d'eau (l'approvisionnement en eau potable par exemple) » (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2009, p. 65). Afin de garantir l'approvisionnement nécessaire à la production de neige artificielle lorsque les quantités d'eau sont limitées en hiver, des bassins de stockage ont été construits dans l'optique de stocker l'eau abondante en été et en automne.

La sylviculture et la production de bois sont essentielles pour les régions montagneuses bien que l'altitude et d'autres facteurs rendent les forêts de montagne moins productives et moins rentables en comparaison des forêts de moindre altitude. De fait, la production et la transformation du bois ont souvent été délocalisées vers les basses terres (Price et al., 2011). Cependant, les forêts de montagne jouent un rôle clé dans la gestion de l'eau (Schyns et Vanham, 2019). En fonction des types d'arbres, elles peuvent retenir d'importantes quantités d'eau et d'humidité dans les bassins versants supérieurs, stabiliser les sols et réduire l'érosion, contribuant à la réduction des risques de catastrophes naturelles liés à l'eau. À ce titre, il convient de les considérer comme des solutions fondées sur la nature. Ce qui n'est toutefois pas le cas des plantations d'arbres destinées à la production de bois car leur capacité d'absorption s'avère généralement inférieure à celle des forêts naturelles. Les répercussions de la sylviculture sur la qualité de l'eau comprennent « l'apport de sédiments, les pertes de nutriments, le transport de carbone, les rejets de métaux et de cations basiques » ainsi que « les changements d'acidité et de température » (Shah et al., 2022, p. 1).

Encadré 5.1 Protéger les glaciers des impacts de l'exploitation minière : la mine de Pascua-Lama au Chili

Pascua-Lama est une mine d'or à ciel ouvert, située entre 3 800 et 5 200 mètres d'altitude dans les Andes, à cheval sur la frontière entre l'Argentine et le Chili. Elle est représentative de l'interaction complexe entre les intérêts, les perspectives et les perceptions des entreprises, des gouvernements et des populations autochtones à l'œuvre lorsque l'on considère la situation des glaciers et de l'approvisionnement en eau (Kronenberg, 2009 ; Amos-Landgraf, 2021).

Les trois glaciers concernés se trouvent du côté chilien de la frontière et sont de petite taille. À la suite d'une étude d'impact environnemental, une société minière a reçu, dans un premier temps, l'autorisation de déplacer les glaciers en transportant la glace sur un glacier voisin. Cependant, les résidents locaux, la communauté internationale et le Gouvernement chilien s'y sont opposés en raison des menaces que faisait peser ce bouleversement sur l'agriculture, l'environnement et la santé.

En 2006, les services environnementaux chiliens ont interdit à la société minière toute intervention sur les glaciers, l'enjoignant à veiller à leur protection et à leur contrôle. L'importance que revêtaient ces glaciers pour les communautés en aval du fait de leur ruissellement a fortement influencé cette décision. Les glaciers de petite taille sont plus sensibles au réchauffement climatique et leur valeur dépend davantage du lieu où ils se trouvent (Kronenberg, 2009). Étant donné que la fonte des glaciers est désormais devenue symbole du réchauffement climatique, il est probable que les dimensions politiques et sociétales aient eu une influence sur la décision.

En 2013, le projet minier a été suspendu à la suite d'une pétition lancée par la communauté autochtone Diaguita, installée à proximité de la mine, et invoquant une extraction excessive de l'eau des glaciers et du fleuve Estrecho. En 2020, le Premier tribunal environnemental du Chili a ordonné la fermeture de la mine et a imposé une amende à la société minière qui est notamment accusée d'avoir contaminé le fleuve Estrecho alimenté par les glaciers – et qui constitue une importante source d'eau à usage domestique et d'irrigation à l'échelle régionale – et de ne pas avoir correctement évalué les impacts des activités de la mine sur les glaciers andins. Il a également été établi que les forages d'exploration avaient compromis le filtrage des eaux souterraines et entraîné la pollution des rivières locales.

La situation de Pascua-Lama reflète une inclinaison de plus en plus grande vers la préservation et la valorisation des glaciers, qui a permis la protection juridique des glaciers concernés. Ce projet a facilité un large débat sur l'exploitation minière et ses effets potentiels sur les glaciers.

5.4

L'hydroélectricité dans les régions montagneuses

La production hydroélectrique constitue l'un des principaux secteurs d'activité des régions montagneuses (WWAP, 2014). Son développement a commencé à la fin du XIX^e siècle en Europe et en Amérique du Nord, avant de ralentir jusqu'aux années 1970 en raison de l'accentuation de l'opposition des mouvements écologistes et de la pénurie de sites adaptés. Dans le reste du monde, l'exploitation hydroélectrique a pris de l'ampleur après la Seconde Guerre mondiale et reste importante à ce jour. Les centrales hydroélectriques peuvent disposer de capacités élevées (>100 mégawatts), moyennes (15-100 mégawatts) ou faibles (<15 mégawatts).

Le barrage, le réservoir et l'usine hydroélectrique de Nurek, en Asie centrale, constituent un exemple type d'aménagement hydroélectrique de grande envergure dans les régions montagneuses. Situés le long du fleuve Vakhch, au Tadjikistan, ils sont installés sur une cascade qui comprend la centrale hydroélectrique de Rogun actuellement en construction (Rahimzoda, 2024). Ces infrastructures faisaient partie d'un programme de développement intégré mis au point dans les années 1960, à l'époque où la région dépendait de l'ancienne Union soviétique. Leur objectif était de produire de l'électricité destinée au développement industriel et de contribuer à l'expansion de l'agriculture de montagne, grâce à une irrigation par pompage, tout en régulant l'eau d'irrigation en aval et le contrôle des inondations pour le Tadjikistan et les pays situés en aval (Kalinovsky, 2021).

• • •

La production hydroélectrique constitue l'un des principaux secteurs d'activité des régions montagneuses

Après avoir produit la majeure partie de l'électricité du pays pendant quarante ans, Nurek est en cours de modernisation en vue d'optimiser son fonctionnement. Le réservoir rétrécit toutefois en raison de son envasement, perdant progressivement sa capacité de régulation hydrique et de production électrique. L'achèvement d'autres installations le long de la cascade de Vakhsh, en particulier celle de Rogun, devrait permettre d'atténuer ce problème. Le financement nécessaire s'avère colossal en comparaison de la taille de l'économie nationale tout comme les répercussions sociales et environnementales évaluées en coopération avec les pays voisins (Banque mondiale, 2014).

On recense également de nombreuses centrales hydroélectriques de faible et de moyenne capacité dans les régions montagneuses, y compris des usines hydroélectriques au fil de l'eau. L'inclinaison du terrain permet de produire de l'électricité sans avoir recours à de grands barrages ou réservoirs. La conception et l'implantation de centrales hydroélectriques de petite taille tendent généralement à réduire les impacts de la production hydroélectrique sur les ressources en eau, la biodiversité et le paysage. En altitude, il s'avère néanmoins rare que les petites centrales hydroélectriques soient opérationnelles par temps froid en raison du gel et du manque de précipitations (Katsoulakos et Kaliampakos, 2014).

L'installation de centrales hydroélectriques de petite taille hors réglementation et sans planification peut avoir des impacts néfastes sur les ressources en eau. À titre d'exemple, certaines rivières de Géorgie ont été asséchées par la présence d'un trop grand nombre de centrales hydroélectriques de petite taille (Japoshvili et al., 2021). En 2018, la Convention alpine – un accord régional sur l'environnement – a publié des directives spécifiques pour l'emploi de petites centrales hydroélectriques (Plateforme Gestion de l'eau dans les Alpes, 2018).

Les centrales hydroélectriques situées dans les régions montagneuses peuvent donc s'avérer trop grandes pour le lieu mais aussi trop petites pour être efficaces. Leur conception revêt par conséquent une importance extrême. Il est indispensable de s'appuyer sur plusieurs documents importants, en prenant en considération les spécificités des régions montagneuses, y compris les effets de cascade, afin de guider leur réalisation. Ainsi, un plan de gestion du bassin hydrographique, une évaluation environnementale stratégique, une politique énergétique nationale, une évaluation des risques liés au changement climatique, une évaluation des incidences environnementales et sociales (parfois optionnelle pour les petits projets), un plan de gestion environnementale et sociale ainsi que des règles opérationnelles peuvent s'avérer nécessaires.

• • •

Du fait de la fragilité des écosystèmes de montagne, la protection de l'environnement constitue l'une des principales résistances à l'exploitation hydroélectrique

La fonte des glaciers et le ruissellement des précipitations peuvent s'écouler le long de pentes abruptes sur des distances relativement courtes, ce qui permet de produire de l'électricité. La forme des vallées montagneuses se prête à la construction de barrages. Il est également possible de trouver les matériaux de construction pour les batardeaux¹⁴ et d'autres structures adaptées au niveau local. Lorsque des salles des machines sont construites à l'intérieur de la roche des montagnes, les turbines et autres composants de la centrale hydroélectrique sont à l'abri des inondations, des coulées de boue et d'autres dégâts naturels.

Les réservoirs situés en zones montagneuses peuvent stocker de grandes quantités d'eau qui permettront de produire de l'énergie hydroélectrique au moment voulu et de réduire de la sorte la dépendance saisonnière. L'hydroélectricité ne cesse de gagner en importance avec le développement de sources d'énergie renouvelables telles que le solaire et l'éolien, dont la production varie et doit être compensée rapidement afin de permettre aux réseaux électriques de maintenir leur puissance. En tant que tels, les réservoirs hydroélectriques constituent un stockage pour les ressources en eau comme pour les énergies renouvelables (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2017). Ils peuvent donner naissance à de nouveaux écosystèmes susceptibles de devenir des zones de forte biodiversité. Le lac Vlasina en Serbie, par exemple, est désormais protégé par la Convention de Ramsar sur les zones humides.

De façon générale, les régions montagneuses possèdent une densité de population et des revenus économiques moindres que les basses terres adjacentes (Thornton et al., 2022). C'est pourquoi le recours à l'hydroélectricité peut avoir des impacts socio-économiques moins forts en amont qu'en aval. Il faut aussi noter que les communautés montagnardes et leurs responsables disposent habituellement de ressources humaines et financières limitées pour s'opposer à ce type d'exploitations. Cependant, les régions montagneuses ne sont pas coupées des autres régions. Même éparpillés à travers le monde, les habitants des montagnes, les élites urbaines et d'autres parties prenantes peuvent unir leurs forces en vue de proposer des alternatives pour le développement de zones qui seront sinon destinées à l'exploitation hydroélectrique ou à de grands projets d'infrastructure (Perlik, 2019).

Du fait de la fragilité des écosystèmes de montagne, la protection de l'environnement constitue l'une des principales résistances à l'exploitation hydroélectrique. La construction et la présence de barrages et de réservoirs, de lignes électriques et de sous-stations ne sont pas sans effets. Les barrages troubent notamment la biodiversité aquatique : les réservoirs de grande longueur créent des obstacles à la migration des grands mammifères et les travaux de construction perturbent le lit des rivières, détruisent les zones humides, modifient les habitats, l'hydrogéologie et le climat local, tout comme ils perturbent la vie aquatique (WWAP, 2014).

Les passes à poissons et autres méthodes choisies pour atténuer ou compenser les dommages ainsi causés ne sont pas vraiment efficaces (FAO/DWK, 2002 ; Venus et al., 2020). Les aménagements du lit des rivières peuvent également contribuer à la réduction des impacts sur l'environnement, à l'instar de ceux des rivières Loisach ou Iller en Allemagne. Cependant, la disponibilité de l'eau reste un facteur crucial (ONUDI/Centre international pour les petites centrales hydroélectriques, 2022). Les sédiments présents dans les eaux de montagne endommagent également les éléments des installations et s'accumulent dans les réservoirs, ce qui tend à réduire la durée de vie des usines hydroélectriques. Le rinçage des sédiments et d'autres techniques permettent de gérer ce problème. Les centrales hydroélectriques peuvent également être construites en cascade le long d'une même rivière afin de limiter l'accumulation. De fait, il peut s'avérer utile d'adopter une approche basée sur l'interaction eau-énergie-alimentation-écosystèmes afin de traiter ces problèmes (Wymann von Dach et Fleiner, 2019).

¹⁴ Parois temporaires étanches destinées à bloquer l'eau.

Les réservoirs de montagne peuvent contribuer à l'adaptation au changement climatique en stockant l'eau en vue de son utilisation en période de sécheresse et en stockant l'excédent des rivières, ce qui minimise les inondations en aval (Présidence française de la Convention alpine, 2020 ; Adler et al., 2022). Ces infrastructures peuvent s'avérer fondamentales pour la réduction des risques de catastrophe naturelle mais également être endommagées par les tremblements de terre, les glissements de terrain, les coulées de boue, les inondations et une détérioration structurelle. La catastrophe de Chamoli, qui s'est produite en 2021 dans le nord de l'Inde (Shugar et al., 2021), illustre bien ce problème. Dans ce cas, une avalanche de roches et de glace a provoqué une coulée de boue et de débris qui a détruit deux centrales hydroélectriques en construction en aval, dont la valeur dépassait les 223 millions de dollars EU. En 1963, 1 917 personnes ont été tuées par un événement similaire sur le cours du Vajont dans le nord de l'Italie, lorsque le barrage a débordé et inondé toute une vallée (Merlin, 2001). La mauvaise gestion des réservoirs de montagne peut conduire à ce genre d'accidents, y compris transfrontaliers.

Le changement climatique affecte la production d'énergie hydroélectrique en raison de facteurs tels que la fonte des glaciers, l'altération des régimes de précipitations et l'augmentation des évaporation. Il n'existe pas de données sur le degré de dépendance de la production existante et prévue d'hydroélectricité à l'égard de la fonte des glaciers au niveau mondial. Il n'est donc pas aisément d'évaluer les répercussions du bouleversement de la cryosphère sur la production d'énergie hydroélectrique et de déterminer s'il existe une compensation positive ou négative par d'autres facteurs, telle l'augmentation des précipitations et de l'évaporation. Rien ne permet non plus de prouver que le réchauffement climatique augmentera la quantité d'eau disponible en vue de la production hydroélectrique. Il semble que l'augmentation de la fonte des glaciers soit compensée par une augmentation de l'évaporation (Cooley, 2023). Les satellites révèlent une baisse généralisée des volumes d'eau stockés dans les lacs de la planète, y compris dans les réservoirs artificiels (Yao et al., 2023). Par conséquent, il est possible que le pic de fonte (voir encadré 2.2) ait déjà été dépassé à l'échelle mondiale, en particulier pour les centrales hydroélectriques qui sont équipées de grands réservoirs situés à des altitudes et à des latitudes plus basses où l'évaporation est plus importante.

5.5 Permettre un développement industriel inclusif et durable

Des solutions existent ou sont en cours d'élaboration pour rendre l'industrie et la production d'énergie plus durables dans les régions montagneuses. Elles peuvent être regroupées en trois catégories : la promotion d'une économie circulaire de l'eau, le développement de technologies respectueuses de l'environnement (ainsi que l'augmentation des investissements au profit de l'environnement, de la société et de la gouvernance) et la gouvernance de l'eau.

En vertu d'une économie circulaire, il est possible de promouvoir la réduction de la consommation en eau, le réemploi des ressources en eau et le recyclage des eaux usées (WBCSD, 2017 ; Delgado et al., 2021). À Arequipa, au Pérou, une société minière opérant en région montagneuse a pu satisfaire ses besoins en eau et répondre aux problèmes d'eaux usées de la ville par l'intermédiaire d'un partenariat public-privé avec le service municipal de distribution d'eau. L'entreprise a pris en charge le financement et la construction d'une station d'épuration capable de traiter 95 % des eaux usées municipales tout en en réutilisant une partie pour les opérations minières et en rejetant de l'eau propre dans la rivière locale. Cette solution a permis l'expansion de la mine comme l'économie de plus de 335 millions de dollars EU à la ville tout en permettant la revitalisation de la rivière, ce qui a profité aux agriculteurs et aux habitants (Banque mondiale, 2019).

• • •

La transformation des infrastructures grises en infrastructures vertes ou leur remplacement par ces dernières peut s'avérer particulièrement adapté aux régions montagneuses

Le stockage d'hydroélectricité par pompage utilise l'électricité excédentaire aux heures creuses pour pomper de l'eau vers un réservoir, ce qui permet de stocker à la fois plus d'eau et un potentiel d'énergie. Il représente 95 % de la capacité de stockage d'électricité mondiale, principalement dans les régions montagneuses (IRENA, 2023). L'eau stockée est relâchée pour produire de l'électricité aux périodes de forte demande. Bien que consommant plus d'énergie qu'il n'en génère et stockant de l'eau en amont qui peut se perdre par évaporation, le stockage d'hydroélectricité par pompage offre une opportunité de stockage de l'eau et de l'énergie en équilibrant les charges, qui est précieuse pour la stabilité du réseau électrique. À titre d'exemple, la plus grande centrale hydroélectrique à accumulation par pompage au monde est la centrale électrique de Fengning, en Chine, qui dispose d'une capacité de 3 600 mégawatts. Sa construction a débuté en 2013 et s'est achevée en 2021 pour un budget total de 1,87 milliard de dollars EU. Son fonctionnement repose sur deux réservoirs : le réservoir inférieur dispose d'une capacité de 66,15 millions de mètres cubes d'eau et le réservoir supérieur d'une capacité de 48,83 millions de mètres cubes. Elle a été conçue pour avoir une capacité de production électrique de 6 612 gigawattheures (GWh) par an à partir du stockage (IRENA, 2020 ; Morales Pedraza, 2024).

Les technologies respectueuses de l'environnement comprennent l'emploi de technologies moins polluantes, une meilleure gestion des ressources et un recyclage efficace des déchets. Elles peuvent former des systèmes intégrés alliant des connaissances techniques, des procédures opérationnelles et des structures organisationnelles destinés à favoriser le développement durable. Ces technologies constituent des alternatives plus écologiques aux méthodes conventionnelles, notamment pour réduire la consommation d'eau et d'énergie dans la production de neige artificielle (Grünwald et Wolfsperger, 2019). Certaines entreprises perfectionnent leurs dispositifs de vannes dans l'optique de rendre l'utilisation de l'eau plus efficace et ont recours à des compresseurs sans huile afin de garantir l'absence de déversement d'huile dans la nature. En outre, il est possible d'exploiter les données afin de produire la bonne quantité et la bonne qualité de neige, réduisant ainsi le gaspillage des ressources. À ceci s'ajoute l'occasion de fournir des formations et de mener un travail de sensibilisation à l'emploi efficace des ressources en eau et en énergie, ce qui représente un bénéfice supplémentaire (TechnoAlpin, 2023).

Lorsque les infrastructures industrielles et électriques existantes ne répondent pas aux normes actuelles en matière de technologies respectueuses de l'environnement, la transformation des infrastructures grises en infrastructures vertes ou leur remplacement par ces dernières (WWAP/ONU-Eau, 2018), y compris par ré-ensauvagement, peut s'avérer particulièrement adapté aux régions montagneuses.

La gestion de l'eau, les investissements au profit de l'environnement, de la société et la gouvernance, la recherche et le développement, ainsi que la surveillance réglementaire sont des éléments essentiels dans les situations où une économie circulaire, des technologies respectueuses de l'environnement et d'autres actions efficaces sont mises en place (Kohler et al., 2012). Il existe peu d'approches à l'usage de l'eau par les secteurs de l'industrie et de l'énergie qui soient spécifiques aux régions montagneuses (Scott et al., 2023). Les tentatives pour instaurer des interdictions spécifiques à l'exploitation hydroélectrique et à d'autres types d'infrastructures présentes dans les régions montagneuses se sont révélées infructueuses et n'ont pas abouti à des instruments juridiques contraignants ou à des outils politiques décisifs, comme le démontre l'exemple du Protocole d'application de la Convention alpine dans le domaine de l'énergie de 2005, qui ne fournit que des directives générales (Allemagne/Autriche/Communauté européenne/France/Italie/Liechtenstein/Monaco/Slovénie/Suisse, 2005 ; ARE, 2014). Compte tenu des spécificités d'emploi de l'eau propres aux secteurs de l'industrie et de l'énergie dans les régions montagneuses, en particulier dans un contexte de fonte des glaciers, il faut espérer que cet exemple inspirera des approches plus ciblées à l'avenir (Katsoulakos et Kaliampakos, 2014).

Références

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Allemagne/Autriche/Communauté européenne/France/Italie/Liechtenstein/Monaco/Slovénie/Suisse. 2005. « Protocole d'application de la convention alpine de 1991 dans le domaine de l'énergie (Protocole « Énergie ») ». *Journal officiel de l'Union européenne*, L 337 du 22/12/2005. eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L:2005:337:FULL&from=FR.

Amos-Landgraf, I. 2021. « Chile's Pascua-Lama Mine Legally Shut Down, but Mining Exploration Continues ». *State of the Planet*. New York, Columbia Climate School. news.climate.columbia.edu/2021/01/15/pascua-lama-mine-shut-down/.

ARE (Office fédéral du développement territorial, Suisse). 2014. *Activity Report of the Energy Platform for the Years 2013–2014*. Berne, ARE.

Banque mondiale. 2014. *Rogun Hydropower Project: Final Report of the Environmental and Social Panel of Experts*. Washington, Banque mondiale. www.worldbank.org/en/country/tajikistan/brief/final-reports-related-to-the-proposed-rogun-hpp.

—. 2019. *Wastewater: From Waste to Resource – The Case of Arequipa, Peru*. Washington, Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/120995b1-dbbb-5e48-b6b8-abfabe6f312f/content.

Beard, D. B., Clason, C. C., Rangecroft, S., Poniecka, E., Ward, K. J. et Blake, W. H. 2022a. « Anthropogenic contaminants in glacial environments I: Inputs and accumulation ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 46, n° 4, p. 630 à 648. doi.org/10.1177/03091333221107376.

—. 2022b. « Anthropogenic contaminants in glacial environments II: Release and downstream consequences ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 46, n° 5, p. 790 à 808. doi.org/10.1177/03091333221127342.

Cabello, V., Willaarts, B. A., Aguilar, M. et Del Moral Ituarte, L. 2015. « River basins as social-ecological systems: Linking levels of societal and ecosystem water metabolism in a semiarid watershed ». *Ecology and Society*, vol. 20, n° 3, p. 20. doi.org/10.5751/ES-07778-200320.

CEE (Commission économique des Nations Unies pour l'Europe). 2014. *Safety Guidelines and Good Practices for Tailings Management Facilities*. Genève, CEE. unece.org/DAM/env/documents/2014/TEIA/Publications/1326665_ECE_TMF_Publication.pdf.

—. 2016. *Liste de contrôle pour la planification des interventions d'urgence en cas d'accidents affectant les eaux transfrontières, assortie d'un document d'orientation*. Genève, CEE. unece.org/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.f_Checklist_for_contingency.pdf.

CEPALC (Commission économique des Nations Unies pour l'Amérique latine et les Caraïbes). 2023. *Lithium Extraction and Industrialization: Opportunities and Challenges for Latin America and the Caribbean*. Santiago, CEPALC. repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8d505030-7686-44e1-9f60-77ceb0610826/content.

Chamanara, S. et Madani, K. 2023. *The Hidden Environmental Cost of Cryptocurrency: How Bitcoin Mining Impacts Climate, Water and Land*. Hamilton, Canada, Institut pour l'eau, l'environnement et la santé de l'Université des Nations Unies (UNU-INWEH). doi.org/10.53328/INR23ASC02.

Church, J. M. 2024. *Policy Brief "Central Asia's Trade in Virtual Water: SPECA Policy Brief on Sustainable Trade and Water Management*. Forum économique de 2024, Douchanbé, 26 novembre 2024. Programme spécial des Nations Unies pour les pays d'Asie centrale (SPECA). unece.org/speca/documents/2024/11/working-documents/policy-brief-central-asias-trade-virtual-water-speca-0.

Collantes, F. 2009. « Rural Europe reshaped: The economic transformation of upland regions, 1850–2000 ». *The Economic History Review*, vol. 62, n° 2, p. 306 à 323. doi.org/10.1111/j.1468-0289.2008.00439.x.

Connor, R. et Chaves Pacheco, S. M. 2024. *Global Employment Trends and the Water Dependency of Jobs*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388410.

Cooley, S. W. 2023. « Global loss of lake water storage ». *Science*, vol. 380, n° 6646, p. 693. doi.org/10.1126/science.adl0992.

Delgado, A., Rodríguez, D. J., Amadei, C. A. et Makino, M. 2021. *Water in Circular Economy and Resilience (WICER)*. Washington, Banque internationale pour la reconstruction et le développement/Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36254/163924.pdf.

Division de statistique de l'ONU, s.d. UN Data: A World of Information. Site web de la Division de statistique de l'ONU. data.un.org/.

FAO/DWK (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Association Allemande pour les Ressources en Eau et l'Amélioration des Sols). 2002. *Fish Passes: Design, Dimensions and Monitoring*. Rome, FAO/DWK. www.fao.org/3/y4454e/y4454e.pdf.

FAO/ONU Tourisme (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Organisation mondiale du tourisme). 2023. *Understanding and Quantifying Mountain Tourism*. Rome/Madrid, FAO/ONU Tourisme. doi.org/10.18111/9789284424023.

Füreder, L., Weingartner, R., Heinrich, K., Braun, V., Köck, G., Lanz, K. et Scheurer, T. (éds). 2018. *Alpine Water – Common Good or Source of Conflicts? Proceedings of the ForumAlpinum 2018 and 7th Water Conference*. Breitenwang, Autriche, 4 au 6 juin 2018. Académie autrichienne des sciences. doi.org/10.1553/forumalpinum2018.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.

Grünewald, T. et Wolfsperger, F. 2019. « Water losses during technical snow production: Results from field experiments ». *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, n° 78. doi.org/10.3389/feart.2019.00078.

Hamberger, S. et Doering, A. 2015. *Der gekaufte Winter: eine Bilanz der künstlichen Beschneiung in den Alpen* [L'hiver acheté : une étude de la production de neige artificielle dans les Alpes]. Munich, Allemagne, Gesellschaft für ökologische Forschung (GöF)/Bund Naturschutz in Bayern (BN). www.vzsb.de/media/docs/Der_gekaufte_Winter_-8.12.2015.pdf. (en allemand).

IRENA (Agence internationale pour les énergies renouvelables). 2020. *Innovation Landscape Brief: Innovative Operation of Pumped Hydropower Storage*. Abou Dhabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Innovative_PHS_operation_2020.pdf.

—. 2023. *The Changing Role of Hydropower: Challenges and Opportunities*. Abou Dhabi, IRENA. www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf.

Japoshvili, B., Couto, T. B. A., Mumladze, L., Epitashvili, G., McClain, M. E., Jenkins, C. N. et Anderson, E. P. 2021. « Hydropower development in the Republic of Georgia and implications for freshwater biodiversity conservation ». *Biological Conservation*, vol. 263, n° 109359. doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109359.

Kalinovsky, A. M. 2021. *Laboratory of Socialist Development: Cold War Politics and Decolonization in Soviet Tajikistan*. Ithaca, États-Unis, Cornell University Press.

Katsoulacos, N. M. et Kaliampakos, D. C. 2014. « What is the impact of altitude on energy demand? A step towards developing specialized energy policy for mountainous areas ». *Energy Policy*, vol. 71, p. 130 à 138. doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.003.

Kohler, T., Pratt, J., Debarbieux, B., Balsiger, J., Rudaz, G. et Maselli, D. (éds). 2012. *Sustainable Mountain Development, Green Economy and Institutions: From Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Direction suisse du développement et de la coopération (DDC)/Centre pour le développement et l'environnement (CDE). www.fao.org/3/cc9690en/cc9690en.pdf.

Kronenberg, J. 2009. *Global Warming, Glaciers and Gold Mining*. Actes de la Huitième Conférence internationale de la Société européenne d'économie écologique. Ljubljana, 29 juin au 2 juillet 2009. center-hre.org/wp-content/uploads/2013/03/Kronenberg-Global-warming-Glaciers-and-Gold-Mining.pdf.

Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. et Brack, W. 2023. « Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution ». *Environmental Sciences Europe*, vol. 35, n° 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.

Malo-Larrea, A., Santillán, V. et Torracchi-Carrasco, E. 2022. « Looking inside the blackbox: Cuenca's water metabolism ». *PLoS ONE*, vol. 17, n° 9, article e0273629. doi.org/10.1371/journal.pone.0273629.

Merlin, T. 2001. *Sulla pelle viva: come si costruisce una catastrofe, il caso del Vajont* [Sur la surface vivante : Comment se construit une catastrophe, le cas de Vajont]. Sommacampagna, Italie, Cierre edizioni. edizioni.cierrenet.it/wp-content/uploads/2021/12/Sulla-pelle-viva_2021_antepriima.pdf. (en italien).

Mishra, H. R. 2002. « Mountains of the developing world: Pockets of poverty or pinnacles for prosperity ». *Unasylva*, vol. 53, n° 1. www.fao.org/3/Y3549E/y3549e06.htm.

Modica, M. 2022. *Alpine Industrial Landscapes: Towards a New Approach for Brownfield Redevelopment in Mountain Regions*. Wiesbaden, Allemagne, Springer. doi.org/10.1007/978-3-658-37681-9.

Morales Pedraza, J. 2024. « Toward a green economy in China: Current status and perspective in electricity generation ». *Academia Green Energy*, vol. 1, n° 1, p. 1 à 28. doi.org/10.20935/AcadEnergy6236.

Nordregio (Centre nordique de développement spatial). 2004. *Mountain Areas in Europe: Analysis of Mountain Areas in EU Member States, Acceding and other European Countries*. Étude pour la Commission européenne, DG REGIO. Stockholm, Nordregio. archive.nordregio.se/en/Publications/Publications-2004/Mountain-areas-in-Europe/index.html.

ONUDI (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel). 2017. *Green Chemistry and Beyond Manufacturing Without POPs*. Vienne, ONUDI. www.unido.org/sites/default/files/2017-07/UNIDO_leaflet_08_ManufacturingWithoutPOPs_170124_final_0.pdf.

ONUDI/Centre international pour les petites centrales hydroélectriques (Organisation des Nations Unies pour le développement industriel/Centre international pour les petites centrales hydroélectriques). 2022. *World Small Hydropower Development Report 2022*. Vienne/Hangzhou, Chine, ONUDI/Centre international pour les petites centrales hydroélectriques. www.unido.org/WSHPDR2022.

Orr, B. J., Dosdogru, F. et Sánchez Santiváñez, M. 2024. « Chapter 3 – Land degradation and drought in mountains ». S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Shroder et J. Szarzynski (éds), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Amsterdam, Elsevier, p. 17 à 22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.

Partenariat de la montagne. 2014. *Pourquoi les montagnes sont une priorité pour l'énergie : un appel pour l'action sur les objectifs de développement durable (ODD)*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). openknowledge.fao.org/items/33f39b32-703d-4c06-b430-1476cfbef617.

Perlik, M. 2015. « Mountains as global suppliers: New forms of disparities between mountain areas and metropolitan hubs ». *Journal of Alpine Research*, vol. 103, article 3. doi.org/10.4000/rga.3142.

—. 2019. *The Spatial and Economic Transformation of Mountain Regions: Landscapes as Commodities*. Londres, Royaume-Uni, Routledge. doi.org/10.4324/9781315768366.

Plateforme Gestion de l'eau dans les Alpes. 2018. *Common Guidelines for the Use of Small Hydropower in the Alpine Region*. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie, Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organisation/AC/XI/ACXI_annex_24_2_EN.pdf.

PNUD (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2012. *A Practical Guide: Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining*. Nairobi, PNUD. wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/11524/reducing_mercury_artisanal_gold_mining.pdf.

—. 2024. *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes*. *Global Resources Outlook 2024*. Nairobi, Groupe international d'experts sur les ressources, PNUD. https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901.

Présidence française de la Convention alpine. 2020. *Ressources en eau et rivières alpines : adaptation aux défis du changement climatique*. Actes de la conférence organisée dans le cadre de la Présidence française de la Convention alpine. Impérial Palace, Annecy, France, 18-19 février 2020. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie, Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Fotos/Banner/Topics/watermanagement/Report_water_conference_Annecy_FR.pdf.

Price, M. F., Gratzer, G., Alemayehu Duguma, L., Kohler, T., Maselli, D. et Romeo, R. (éds). 2011. *Mountain Forests in a Changing World: Realizing Values, Addressing Challenges*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/Secrétariat du Partenariat de la montagne/Direction suisse du développement et de la coopération (DDC). www.fao.org/3/i2481e/i2481e.pdf.

Rahimzoda, S. 2024. « Water-energy equation in Central and South Asia: A perspective from Tajikistan ». Z. Adeel et B. Boér (éds), *The Water, Energy, and Food Security Nexus in Asia and the Pacific – Central and South Asia*. Cham, Suisse, Springer. doi.org/10.1007/978-3-031-29035-0_4.

Schyns, J. F. et Vanham, D. 2019. « The water footprint of wood for energy consumed in the European Union ». *Water*, vol. 11, n° 2, p. 206. doi.org/10.3390/w11020206.

Scott, C. A., Khaling, S., Shrestha, P. P., Sebastián Riera, F., Choden, K. et Singh, K. 2023. « Renewable electricity production in mountain regions: Toward a people-centered energy transition agenda ». *Mountain Research and Development*, vol. 43, n° 1, p. A 1 à A8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00062.

Secrétariat permanent de la Convention alpine. 2009. *L'Eau et la gestion des ressources en eau – Rapport sur l'état des Alpes*. Convention Alpine : Signaux alpins - Édition spéciale 2. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie, Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_summary_FR.pdf.

—. 2017. *Towards Renewable Alps: A Progress Report for the Period 2015-2016*. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie, Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/Towards_Renewable_Alps_2017.pdf.

Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. et Nettles, J. 2022. « The effects of forest management on water quality ». *Forest Ecology and Management*, vol. 522, n° 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.

Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., Van Wyk de Vries, M., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning, S. A., Frey, H., Gascoin, S., Haritashya, U. K., Huggel, C., Kääb, A., Kargel, J. S., Kavanagh, J. L., Lacroix, P., Petley, D., Rupper, S., Azam, M. F., Cook, S. J., Dimri, A. P., Eriksson, M., Farinotti, D., Fiddes, J., Gnyawali, K. R., Harrison, S., Jha, M., Koppes, M., Kumar, A., Leinss, S., Majeed, U., Mal, S., Muhuri, A., Noetzli, J., Paul, F., Rashid, I., Sain, K., Steiner, J., Ugalde, F., Watson, C. S. et Westoby, M. J. 2021. « A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya ». *Science*, vol. 373, n° 6552, p. 300 à 306. doi.org/10.1126/science.abb4455.

Sigl, M., Abram, N. J., Gabrieli, J., Jenk, T. M., Osmont, D. et Schwikowski, M. 2018. « 19th century glacier retreat in the Alps preceded the emergence of industrial black carbon deposition on high-alpine glaciers ». *The Cryosphere*, vol. 12, n° 10, p. 3311 à 3331. doi.org/10.5194/tc-12-3311-2018.

Smith López, C., Bogdan, A. M., Belcher, K. et Natcher, D. 2024. « Advancing a WEF nexus security index for Alaska: An informed starting point for policy making ». *Polar Geography*, vol. 47, n° 2, p. 71 à 89. doi.org/10.1080/1088937X.2024.2311785.

Talandier, M. et Donsimoni, M. 2022. « Industrial metabolism and territorial development of the Maurienne Valley (France) ». *Regional Environmental Change*, vol. 22, n° 1, p. 9. doi.org/10.1007/s10113-021-01845-4.

TechnoAlpin. 2023. *2023 Sustainability Report*. Bolzano, Italie, TechnoAlpin. www.technoalpin.com/fileadmin/user_upload/Nachhaltigkeit/Sustainability_Report_ENG.pdf.

Thornton, J. M., Snethlage, M. A., Sayre, R., Urbach, D. R., Vivirol, D., Ehrlich, D., Muccione, V., Wester, P., Insarov, G. et Adler, C. 2022. « Human populations in the world's mountains: Spatio-temporal patterns and potential controls ». *PLoS ONE*, vol. 17, n° 7, article e0271466. doi.org/10.1371/journal.pone.0271466.

Tuihedur Rahman, H. M., Ingram, S. et Natcher, D. 2024. « The cascading disaster risk of water, energy and food systems ». *Environmental Hazards*, vol. 23, n° 5, p. 423 à 442. doi.org/10.1080/17477891.2024.2323105.

Unbehaun, W. et Pröbstl, U. 2006. « Cloudy prospects in winter sport: How competitive are the Austrian winter sport destinations under conditions of climate change? ». *Sustainable Solutions for the Information Society*. Onzième conférence internationale sur la planification urbaine et le développement spatial pour la société de l'information. Vienne, p. 381 à 387. programm.corp.at/cdrom2006/archiv/papers2006/CORP2006_UNBEHAUN.pdf.

Venus, T. E., Smialek, N., Pander, J., Harby, A. et Geist, J. 2020. « Evaluating cost trade-offs between hydropower and fish passage mitigation ». *Sustainability*, vol. 12, n° 20, p. 8520. doi.org/10.3390/su12208520.

WBCSD (Conseil mondial des entreprises pour le développement durable). 2017. *Business Guide to Circular Water Management: Spotlight on Reduce, Reuse and Recycle*. Genève, Conseil mondial des entreprises pour le développement durable. docs.wbcsd.org/2017/06/WBCSD_Business_Guide_Circular_Water_Management.pdf.

Wright, I. A., Wright, S., Graham, K. et Burgin, S. 2011. « Environmental protection and management: A water pollution case study within the Greater Blue Mountains World Heritage area, Australia ». *Land Use Policy*, vol. 28, n° 1, p. 353 à 360. doi.org/10.1016/j.landusepol.2010.07.002.

WWAP (Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau). 2014. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2014 : Eau et énergie*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225741.

WWAP/ONU-Eau (Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau/ONU-Eau). 2018. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261466.

Wymann von Dach, S. et Fleiner, R. 2019. *Shaping the Water-Energy-Food Nexus for Resilient Mountain Livelihoods*. Note d'orientation sur le développement durable des montagnes. Berne, Centre pour le développement et l'environnement (CDE). doi.org/10.7892/boris.131606.

Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J. F., Wada, Y. et Berge-Nguyen, M. 2023. « Satellites reveal widespread decline in global lake water storage ». *Science*, vol. 380, n° 6646, p. 743 à 749. doi.org/10.1126/science.abo2812.

Zoï Réseau environnemental. 2013. *A Short Introduction to Environmental Remediation for Mining Legacies: Case Studies from ENVSEC Work in South East Europe*. Genève, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)/Initiative Environnement et sécurité (ENVSEC). zoinet.org/wp-content/uploads/2017/10/Mining-SEE-Ebook.pdf.

Zou, L., Tian, F., Liang, T., Eklundh, L., Tong, X., Tagesson, T., Dou, Y., He, T., Liang, S. et Fensholt, R. 2023. « Assessing the upper elevational limits of vegetation growth in global high-mountains ». *Remote Sensing of Environment*, vol. 286, n° 113423. doi.org/10.1016/j.rse.2022.113423.

Chapitre 6

Environnement

WWAP de l'UNESCO
David Coates et Richard Connor

Avec les contributions de Elisabeth Bernhardt et Ansgar Fallendorf (PNUE),
Birguy Lamizana Diallo (CLD)

• • •

Les montagnes possèdent souvent une biodiversité endémique plus riche que les basses terres, notamment de grandes variétés génétiques au sein des cultures agricoles et des espèces animales

Les montagnes se composent d'une large diversité de zones écologiques dont chacune résulte d'une combinaison spécifique de facteurs, tels les différences d'altitude, la géomorphologie, l'isolement et les conditions microclimatiques (le rayonnement solaire par exemple). Par conséquent, elles possèdent souvent une biodiversité endémique plus riche que les basses terres, notamment de grandes variétés génétiques au sein des cultures agricoles et des espèces animales (FAO, 2019). De même, la gamme des cultures humaines que l'on y trouve est tout aussi diversifiée (PNUE/Centre GRID-Arendal, 2022). En général, les systèmes montagneux se caractérisent par des températures plus basses et des précipitations plus élevées que les autres milieux (FAO, 2022). Ils abritent 25 des 34 zones sensibles de biodiversité mondiale (FAO/PNUE, 2023).

Concernant les écosystèmes de montagne, les forêts couvrent environ 40 % des régions montagneuses du monde. À haute altitude, elles cèdent la place aux prairies et à la toundra alpine, caractérisée notamment par le pergélisol et les glaciers. En montagne, les sols se constituent sous des conditions climatiques difficiles. Moins profonds et plus vulnérables à l'érosion, ils se distinguent nettement des sols des terrains de basse altitude (Repe et al., 2020). Ils sont aussi souvent et plus facilement dégradés par les activités humaines qui notamment éliminent la végétation et mettent les sols à nu. Or, à haute altitude, la régénération des sols dégradés et, partant, des écosystèmes, est un processus long.

Culminant à une altitude moyenne de 4 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, la chaîne himalayenne de l'Hindou Kouch forme l'écosystème alpin le plus vaste et le plus élevé au monde. Cette chaîne, qui couvre une superficie de plus de 5 millions de kilomètres carrés, forme le plus grand réservoir de neige et de glace en dehors de l'Arctique et de l'Antarctique, contenant environ 100 000 kilomètres carrés de glaciers qui alimentent en eau douce plus de 12 000 lacs et plus de dix larges bassins fluviaux (PNUE, 2022a). La cryosphère, comprenant la neige, les glaciers, le pergélisol et les lacs glaciaires, occupe les deux tiers de la région de façon saisonnière (ICIMOD, 2023). Sur la planète, il existe d'autres écosystèmes aux caractéristiques uniques, notamment l'écosystème du páramo dans les Andes d'Amérique du Sud (encadré 6.1), la chaîne montagneuse des Carpates, les vastes territoires de l'Antarctique et la zone de transition entre la forêt tropicale luxuriante, les prairies alpines et les sommets enneigés du mont Kilimandjaro en Afrique.

6.1

Les services écosystémiques de la cryosphère de montagne

La cryosphère de montagne et les écosystèmes de haute altitude fournissent des services écosystémiques essentiels aux personnes qui y vivent ainsi qu'aux milliards d'habitants des zones de plus basse altitude qui y sont rattachées (figure 6.1.a). Ces services contribuent à la réalisation des objectifs de développement durable (figure 6.1.b). Parmi les services les plus importants figurent les services de régulation de l'eau (notamment le stockage de l'eau et la régulation des inondations). Ainsi, on estime qu'à l'échelle mondiale, deux tiers des cultures irriguées dépendent des eaux de ruissellement provenant des montagnes (Adler et al., 2022 ; voir chapitre 3). La réduction des risques d'érosion et de glissements de terrain, la baisse des températures locales, la séquestration du carbone, la fourniture de nourriture et de fibres ainsi que le maintien d'un ensemble de ressources génétiques pour des cultures et du bétail adaptés aux conditions locales font aussi partie de ces services (FAO/PNUE, 2023).

Les sols de montagne couverts de pergélisol contiennent environ 66 pétagrammes (ou gigatonnes) de carbone organique, soit 4,5 % de tout le carbone organique de la planète (FAO, 2022). De fait, les tourbières de haute altitude stockent le carbone de façon particulièrement prépondérante à l'échelle mondiale (PNUE, 2022b). Les longues chaînes de montagnes, tels la cordillère des Andes, le Grand Caucase et la chaîne himalayenne de l'Hindou Kouch, jouent également un rôle significatif dans la régulation du climat.

Encadré 6.1 Les páramos, des écosystèmes de montagne uniques en Amérique du Sud

On trouve les páramos le long des montagnes des Andes néotropicales qui s'étendent entre la Colombie, l'Équateur, le nord du Pérou et la République bolivienne du Venezuela. Ces écosystèmes de haute altitude sont parmi les plus riches en biodiversité et jouent un rôle critique pour la survie de millions de personnes, car s'y trouvent les principales sources d'eau potable pour les habitants de capitales telles que Bogota et Quito.

La végétation, qui y occupe une place prépondérante, régule la quantité et la qualité des ressources en eau fournies par ces « éponges » andines. En effet, outre le fait qu'il favorise l'infiltration de l'eau dans le sol, le couvert végétal réduit l'évaporation par rapport à un sol nu. De plus, les plantes peuvent capter l'eau contenue dans le brouillard.

Les páramos fournissent également aux populations autochtones des plantes médicinales, des pâtures ainsi que des terres agricoles. Cependant, ces paysages sont en pleine mutation et voient leurs fonctions se réduire.

Source : Baruffol (2020).



Les lagunes de Siecha dans le páramo de Chingaza en Colombie

Photographie : © Matthieu Cattin/Shutterstock*.

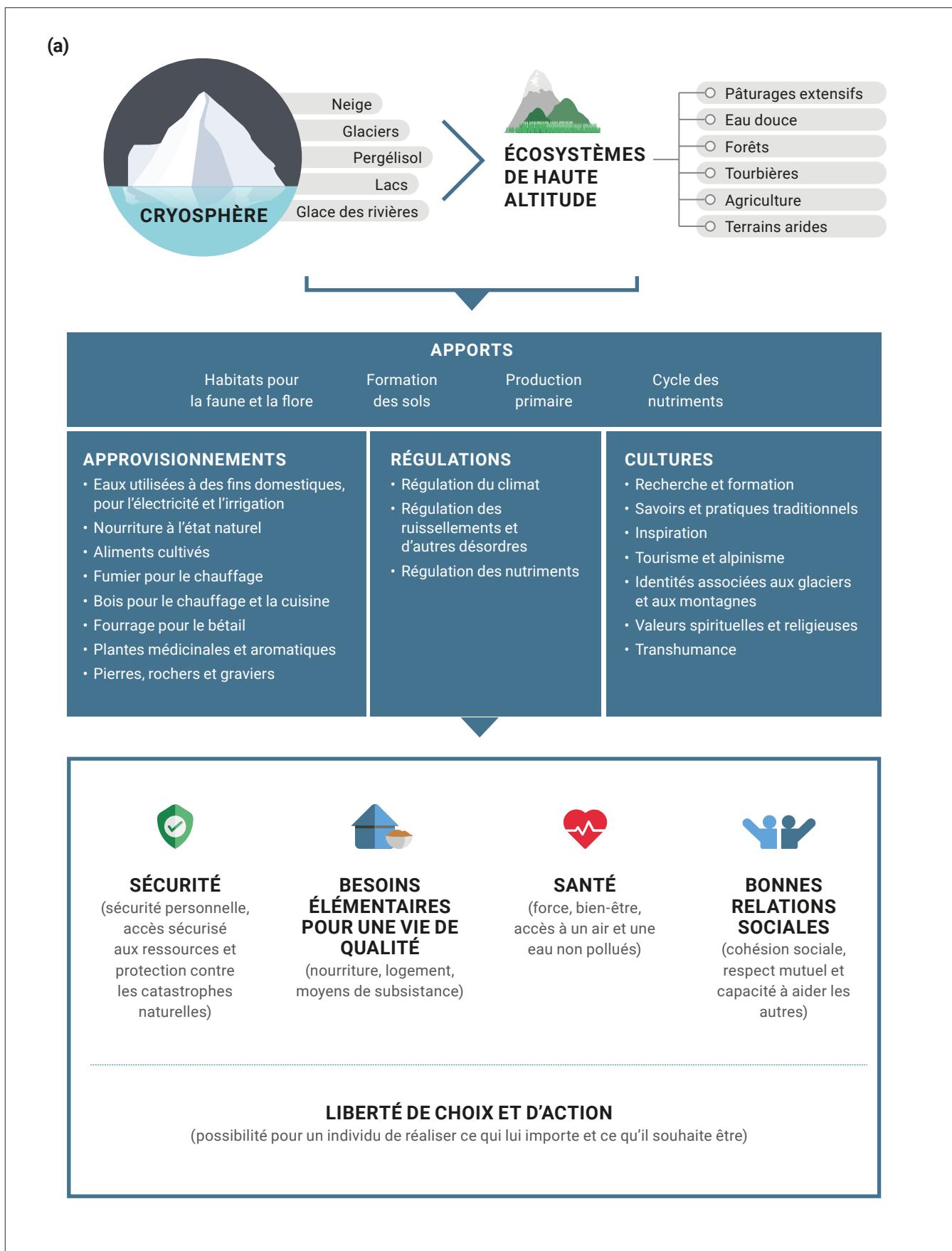
L'agriculture, y compris l'élevage, le bois d'œuvre et d'autres produits sylvicoles constituent souvent les principaux moyens de subsistance des populations. Les pêcheries de haute altitude, qui exploitent des espèces de poissons adaptées aux lieux, peuvent également, quoique souvent négligées, fournir un revenu aux résidents locaux tout comme assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle (FAO, 2003). Toutefois, le changement climatique perturbe la pêche dans les lacs glaciaires (Tingley et al., 2019).

6.2 Évolutions de la cryosphère et des services écosystémiques de montagne

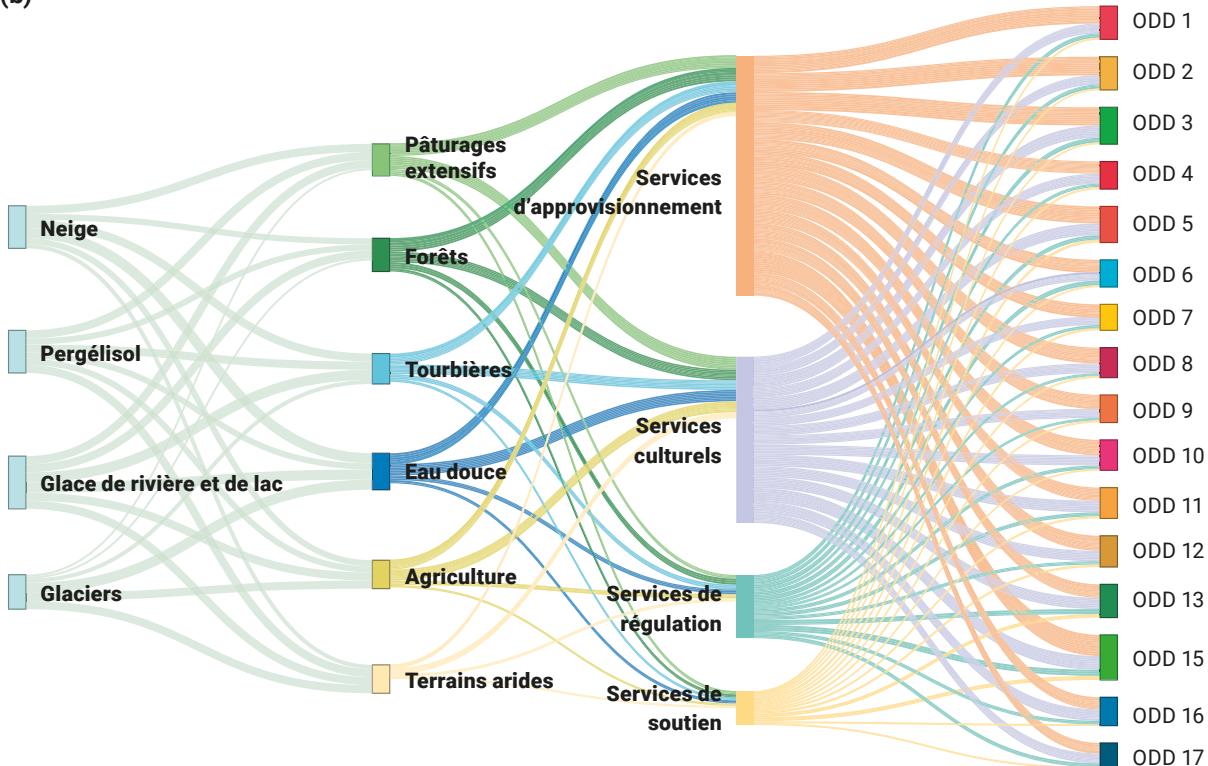
Toutes les régions du monde sont confrontées aux effets bouleversants du changement climatique et des activités humaines incontrôlées, telles la déforestation, l'agriculture intensive, la pollution et la construction d'infrastructures. Dans les régions montagneuses, ceux-ci peuvent entraîner des pertes irréversibles de biodiversité et de services écosystémiques (FAO/PNUE, 2023). En 2020, 57 % des régions montagneuses du monde étaient soumises à des pressions intenses, la dégradation des écosystèmes se concentrant aux plus faibles altitudes, là où se déroulent la plupart des activités humaines (Elsen et al., 2020). À titre d'exemple, la progression de l'urbanisation et de l'exploitation minière ont conduit à la dégradation de plusieurs écosystèmes montagneux (Jiang et al., 2021). La construction de stations de ski provoque la destruction massive de la végétation et des sols, endommageant la végétation autochtone et les propriétés structurelles des sols (Pintaldi et al., 2017). Par ailleurs, la mauvaise conception ou la mauvaise gestion des installations hydrauliques, comme cela peut être le cas de certaines canalisations de cours d'eau, peut entraîner une érosion des berges et la remise en suspension des sédiments, ce qui affecte la qualité de l'eau et l'équilibre des écosystèmes aquatiques (Mikuš et al., 2021).

On observe que la fréquence et l'intensité des risques naturels ont tendance à augmenter dans les zones glaciaires et de haute altitude (voir chapitre 2). Pour autant, tous les désastres naturels dans les régions montagneuses ne sont pas dus au changement climatique. La dégradation des écosystèmes est un facteur ou une cause d'apparition ou d'aggravation d'un grand nombre de ces risques naturels. À Freetown, en Sierra Leone, par exemple, la déforestation massive et le manque de planification urbaine ont accentué un glissement de terrain qui s'est produit en 2017, entraînant la mort de plus d'un millier de personnes (Kargel et al., 2021).

Figure 6.1 (a) Services écosystémiques fournis par la cryosphère de montagne et les écosystèmes de haute altitude ; (b) Liens entre ces services et les objectifs de développement durable (ODD)



(b)



ODD 1 : Éliminer la pauvreté
 ODD 2 : Éliminer la faim
 ODD 3 : Bonne santé et bien-être
 ODD 4 : Éducation de qualité
 ODD 5 : Égalité entre les sexes
 ODD 6 : Eau propre et assainissement
 ODD 7 : Services énergétiques durables et abordables

ODD 8 : Travail décent et croissance économique
 ODD 9 : Industrie, innovation et infrastructure
 ODD 10 : Inégalités réduites
 ODD 11 : Villes et communautés durables
 ODD 12 : Consommation et production responsables

ODD 13 : Lutte contre le changement climatique
 ODD 15 : Écosystèmes terrestres
 ODD 16 : Paix, justice et institutions solides
 ODD 17 : Partenariats pour la réalisation des objectifs

Source : Chaudhary et al. (2023, figures 4.2 et 4.3, p. 132 à 134).

À l'avenir, les changements sur le plan hydrologique conditionneront l'évolution de la plupart des écosystèmes de montagne, plus que les effets directs des changements de température. Ces changements devraient inclure, à court et moyen termes, une augmentation des ruissellements saisonniers au rythme du réchauffement de la cryosphère. À plus long terme, ces changements entraîneront une diminution des ruissellements du fait de la baisse des volumes d'eau stockés par les montagnes, mais avec des fluctuations annuelles de l'ensemble des réserves en eau selon la variabilité des précipitations (Adler et al., 2022). Ainsi, dans la cordillère Royale en Bolivie, où la superficie des zones humides a augmenté au cours de la période 1984-2011 en raison de l'augmentation des précipitations extrêmes et de la fonte des glaciers, cette évolution est susceptible de s'inverser compte tenu de la diminution prévue des précipitations totales et des écoulements d'eau des glaciers (Dangles et al., 2017). Dans les montagnes du Grand Khingan, dans le nord-est de la Chine, on prévoit qu'environ 30 % des zones humides disparaissent d'ici à 2050, un chiffre qui pourrait doubler

• • •

À l'avenir, les changements sur le plan hydrologique conditionneront l'évolution de la plupart des écosystèmes de montagne, plus que les effets directs des changements de température

d'ici à 2100 selon un autre scénario des effets du changement climatique (Wang et al., 2022). Dans les Andes néotropicales, la taille de l'écosystème páramo (encadré 6.1) devrait diminuer de 30 % d'ici à 2050, et ce sans prendre en compte les destructions dues au changement d'affectation des terres (Alfthan et al., 2018).

Le changement climatique s'accompagne de boucles de rétroaction d'une importance considérable. Lorsque les sols de haute altitude et de latitudes élevées sont exposés à des températures atmosphériques plus élevées et lorsque le pergélisol est mis à nu par le recul des glaciers, l'épaisseur de la couche active en dégel entraîne de fortes émissions de carbone. S'il n'y pousse pas rapidement une nouvelle végétation, les sols nus sont exposés en outre à davantage d'érosion et de glissements de terrain (FAO, 2022). Selon deux scénarios de prévision des effets du changement climatique, la superficie de la couche supérieure du pergélisol devrait diminuer de 66 % ou de 99 % d'ici à 2100. Ceci devrait provoquer l'émission de 240 pétagrammes (ou gigatonnes) de carbone sous forme de dioxyde de carbone et de méthane dans l'atmosphère, ce qui pourrait accélérer considérablement le changement climatique (Meredith et al., 2019).

Plus les régions de montagne se réchauffent et la cryosphère recule, plus les espèces et les groupements biologiques tendent à se déplacer vers des altitudes plus élevées, ce qui entraîne un verdissement à des altitudes supérieures. Cette tendance induit aussi bien des effets positifs que négatifs. « Le réchauffement augmente la productivité primaire nette ainsi que l'absorption de carbone de la toundra et de la végétation alpine et accroît la respiration des sols, ce qui peut donner lieu à une modification majeure du cycle du carbone terrestre et du stockage du carbone dans le sol » (PNUE, 2022a, p. 17). L'expansion du couvert végétal renforce la capacité de rétention d'eau des sols alors que la couche active s'épaissit du fait du réchauffement du pergélisol et que l'infiltration est accrue par le couvert végétal. La désertification s'intensifie toutefois dans certaines régions où des cours d'eau prennent leur source (ICIMOD, 2023). « La colonisation des sommets par des espèces allochtones est également de plus en plus fréquente au sein des écosystèmes de montagne avec, pour conséquence, la raréfaction [voire dans les cas extrêmes, l'extinction] d'espèces autochtones ainsi que la perturbation de la fourniture de services écosystémiques » (FAO/PNUE, 2023, p. 6).

Alors qu'une augmentation de la température en altitude peut contribuer à l'expansion des zones de cultures et de plantations, il peut devenir difficile de distinguer entre ce qui relève des effets du changement climatique et ce qui relève de l'influence directe des êtres humains sur ces écosystèmes. Certaines forêts de la région himalayenne de l'Hindou Kouch, par exemple, ont connu plusieurs phases de défrichement, de préservation et de restauration (ICIMOD, 2023). Dans certaines zones de cette même région, le recul net des terres cultivées est attribué à des projets de protection des prairies et à l'urbanisation qui ont marqué les vingt dernières années (Luan et Li, 2021).

Lors de la fonte des neiges au cours des mois de printemps et d'été, des champs de neige rouge — connus sous le nom de « sang des glaciers » ou « neige pastèque » — apparaissent désormais un peu partout dans le monde en raison de la prolifération d'algues rouges. Ces champs diminuent l'albédo de la surface et augmentent l'absorption de l'énergie solaire, accélérant ainsi la fonte de la glace et de la neige (Lutz et al., 2015). Les algues de neige peuvent être les premières à réduire l'albédo des manteaux neigeux humides tandis que les algues présentes sur la glace des glaciers peuvent réduire de façon dominante l'albédo (Halbach et al., 2022). En Amérique du Nord, par exemple, certains glaciers individuels ont eu jusqu'à 65 % de leur surface envahie par des efflorescences algales au cours d'une saison de fonte, ce qui, selon les estimations, a généré en moyenne jusqu'à 3 cm d'équivalent en eau de la neige à la surface du glacier (Engstrom et Quarmby, 2023). On suppose que ce phénomène affecte la qualité des eaux de ruissellement, mais aucune étude détaillée n'a été réalisée à ce sujet.

Il ressort des observations et des travaux de modélisation que le transport de polluants atmosphériques sur de longues distances n'est pas sans conséquence. Dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch, on note une multiplication spectaculaire du carbone noir (voir encadré 2.1) et des métaux lourds comme le mercure dans les carottes de glace et les sédiments lacustres depuis les années 1950, ce qui reflète l'augmentation des émissions de polluants atmosphériques en Asie du Sud (PNUE, 2022a). Or, une fois déposé sur les surfaces de neige et de glace, le carbone noir réduit l'albédo de ces surfaces (qui deviennent alors moins réfléchissantes et absorbent davantage de lumière), ce qui accélère la fonte et accroît le rythme de recul des glaciers (Kang et al., 2020). En retour, les polluants organiques persistants et les métaux lourds déposés dans la cryosphère sont libérés plus rapidement.

En général, on dispose de peu de données sur la qualité hydrique des masses d'eau en montagne (Machate et al., 2023) alors même que la pollution est très répandue dans les régions montagneuses, principalement en raison des activités agricoles, urbaines, minières et industrielles (Elsen et al., 2020). Seules des données fiables existent pour les polluants organiques persistants ; à cet égard, de plus en plus d'éléments montrent que même les lacs de montagne isolés sont exposés à un large éventail de polluants organiques présentant des risques de toxicité chronique pour la biodiversité aquatique en altitude (PNUE, 2022a). C'est le cas notamment dans les montagnes du Caucase, où les rivières géorgiennes du bassin hydrographique de la mer Caspienne sont polluées par des métaux lourds, des hydrocarbures et des pesticides provenant du drainage de grandes entreprises agricoles et minières. La rivière Baksan, qui prend sa source dans la région du mont Elbrouz dans la Fédération de Russie, est aussi polluée par des métaux lourds. Une concentration accrue de pesticides a également été constatée dans les eaux souterraines qui alimentent les eaux minérales du Caucase du Nord (PNUE, 2024).

L'évolution de la biodiversité en haute montagne n'est pas homogène. Si, au niveau mondial, la biodiversité est confrontée à un taux d'extinction d'environ 20 %, ce taux est d'environ 9 % pour les espèces vertébrées et de 5 % pour les espèces végétales dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch (PNUE, 2022a). Plusieurs initiatives de conservation ont été menées avec succès dans la région, ce qui a permis d'accroître le nombre de certaines espèces (dont la gazelle de Przewalski et l'âne sauvage du Tibet) et d'étendre les zones naturelles protégées (Fu et al., 2021). Au cours des dernières décennies, les principaux facteurs de perturbation tels que le changement climatique, l'absence d'approches transfrontières en matière de conservation, les grands projets d'infrastructure, l'arrivée et la propagation d'espèces invasives sont de plus en plus préoccupants (ICIMOD, 2023).

6.3 Actions

Au niveau des écosystèmes, la plupart des solutions visant à remédier aux impacts des changements au sein de la cryosphère et des hautes montagnes consistent à conserver ou à restaurer la fonctionnalité des écosystèmes afin de maintenir ou d'améliorer les services écosystémiques à l'échelle locale ou régionale par le biais de solutions fondées sur la nature ou des adaptations écosystémiques. Les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau ont d'ailleurs constitué le thème de l'édition 2018 du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (WWAP/ONU-Eau, 2018). Du reste, la restauration des écosystèmes se généralise dans les régions montagneuses (FAO/PNUE, 2023).

Les approches mentionnées ci-dessus font communément partie du volet adaptation des contributions déterminées au niveau national de nombreux pays montagneux dans le monde. D'après une méta-analyse portant sur 928 projets de solutions fondées sur la nature à travers le monde, 37 % de ceux-ci portent sur la lutte contre les inondations tandis que 28 % concernent la lutte contre la sécheresse (PNUE, 2021a). Un examen global de 93 solutions fondées sur la nature mises en œuvre en montagne, parmi lesquelles des initiatives autour

• • •

Là où les composants naturels essentiels des écosystèmes sont encore dans un état relativement bon, la priorité doit être donnée à la conservation

du développement d'une agriculture adaptée au climat, de la protection des forêts, du reboisement et de l'agroforesterie, a confirmé le potentiel de ces solutions pour la promotion de trajectoires durables (Palomo et al., 2021).

Là où les composants naturels essentiels des écosystèmes sont encore dans un état relativement bon, la priorité doit être donnée à la conservation. Pour les personnes vulnérables, de multiples avantages peuvent être tirés de la restauration des prairies à l'aide d'espèces autochtones qui accroissent la résilience des espaces naturels, les possibilités de pâturage et le fourrage disponible pendant les périodes sèches, de la conservation et de la gestion de l'eau au moyen d'approches grises et vertes, notamment la restauration des zones ripicoles afin de réduire les inondations et maintenir la qualité de l'eau, et enfin de l'utilisation de pratiques agricoles écologiques diversifiées afin de renforcer la sécurité alimentaire et la subsistance des populations (Swiderska et al., 2018).

Les fonctions protectrices des forêts de montagne ont fait l'objet de beaucoup d'études. Teich et al. (2022) ont remarqué que leurs effets varient considérablement d'un pays à l'autre, tout en soulignant la nécessité d'établir des définitions communes comme d'améliorer la compréhension et l'évaluation de ces fonctions protectrices. Pour leur part, Gidey et al. (2020) indiquent que la sécurité alimentaire, le renforcement de la résilience et l'atténuation du changement climatique comptent parmi les bénéfices de l'agroforesterie couramment évoqués. Quant à l'adaptation écosystémique, elle contribue efficacement à réduire les risques d'inondation et de glissement de terrain, à améliorer la qualité de l'eau et à aider la conservation de la biodiversité dans les régions montagneuses (Lavorel et al., 2019). Toutefois, la récurrence des perturbations peut augmenter les délais de régénération et réduire l'efficacité des solutions fondées sur la nature comme des adaptations écosystémiques (Scheidl et al., 2020).

Face aux menaces que sont la dégradation anthropique et le réchauffement planétaire, la conservation ou l'amélioration de la santé et de la stabilité des sols — comme des services écosystémiques qu'ils alimentent — constituent l'une des principales solutions bénéfiques à la cryosphère et aux régions montagneuses. Compte tenu de la vulnérabilité de ces régions, parvenir à la neutralité en matière de dégradation des sols est un objectif global, convenu à l'échelle mondiale (encadré 6.2), particulièrement pertinent dans ce cas. Les initiatives qui relèvent de solutions fondées sur la nature impliquent souvent la conservation, la restauration ou l'extension des prairies d'altitude ou des forêts en dessous de la limite forestière, ce qui présente généralement de nombreux avantages aux niveaux local et régional (encadré 6.3).

Les approches régionales se concentrent souvent sur la gestion des terres ou des sols. La Convention alpine, par exemple, a adopté un protocole dans le domaine de la protection des sols qui met l'accent sur la conservation et la restauration de ceux-ci, en particulier au niveau des domaines skiables (Repe et al., 2020). Néanmoins, la plantation d'essences d'arbres alloïgènes qui absorbent généralement de plus grandes quantités d'eau peut aussi avoir des répercussions négatives sur les réserves en eau (Xiao et al., 2020). Ainsi, le boisement dans la région montagneuse de Chongqing et sur le plateau Yunnan-Guizhou, dans le sud-ouest de la Chine, a entraîné la mobilisation d'environ 10 % des réserves annuelles en eau, allant jusqu'à provoquer des pénuries en 2015. Bien que les changements d'emploi des terres, dont le boisement et le reboisement, aient eu quelques effets défavorables sur les apports d'eau dans certains endroits de basse altitude du nord-est de la Chine, ils ont également contribué, de façon positive, à l'arrêt de l'érosion des sols (Wang et al., 2022). À cet égard, il convient d'examiner les pratiques de gestion concernées. De fait, la gestion forestière peut avoir une incidence considérable sur l'apport de sédiments, les pertes de nutriments, le transport du carbone, la libération de métaux et de cations basiques ainsi que sur les variations d'acidité et de température (Shah et al., 2022).

Encadré 6.2 Des approches axées sur la neutralité en matière de dégradation des terres (NDT) dans les montagnes

Un cadre résilient pour le maintien de la NDT appliqué au niveau national permet de contribuer à la réalisation de la cible 15.3 des ODD, à savoir parvenir à un monde sans dégradation des terres d'ici à 2030. Applicable à tout type de terrains, dont les terrains montagneux, ce cadre déploie une approche holistique, inclusive et respectueuse des espaces naturels, régie par des principes sociaux et environnementaux visant à protéger les êtres humains et la nature. Il encourage la mise en œuvre de stratégies intégrées et axées sur la nature sur le long terme, stratégies qui portent à la fois sur l'amélioration de la productivité des terres et sur la réhabilitation, la conservation et la gestion durable des terres et des ressources en eau afin d'assainir les écosystèmes et d'améliorer les moyens de subsistance des communautés locales.

Atteindre la NDT passe par une planification intégrée de l'emploi des terres et la gestion intégrée des espaces naturels, qui doivent permettre de gérer les inévitables négociations entre les demandes concurrentes ainsi que d'optimiser la répartition spatiale des interventions sur le terrain.

Les effets positifs constatés du maintien de la NDT sur les écosystèmes de montagne incluent la réduction de la perte de sol, l'amélioration de la production et la hausse des revenus au niveau local, un débit plus fiable des cours d'eau en aval en période de sécheresse et la maîtrise des inondations après de fortes précipitations. Au mois de novembre 2024, 131 pays signataires de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification s'étaient fixés des objectifs concernant la NDT afin de prévenir la perte future de capital naturel foncier en renforçant les bonnes pratiques de gestion et de restauration des terres. Le cadre résilient pour le maintien de la NDT constitue aussi une solution appropriée et bénéfique à la nature pour d'autres pays qui se sont engagés à préserver leurs régions montagneuses vierges.

Sources : Critchley et al. (2021) et Orr et al. (2017 ; 2024).

Encadré 6.3 Acción Andina : la restauration des espaces forestiers dans les hautes Andes

Les montagnes des hautes Andes abritent de riches écosystèmes forestiers, dont dépendent une faune variée, ainsi que des centaines de millions de personnes dans toute l'Amérique du Sud. Elles fournissent de l'eau douce qui alimente les cours supérieurs de l'Amazone ainsi que les villes et villages avoisinants. Cependant, à la suite de siècles de déforestation, il ne reste plus des forêts primaires des hautes Andes que 3 % à 10 % de leur étendue initiale tandis que le changement climatique accélère la fonte des glaciers. Les personnes les plus vulnérables – les habitants des hautes Andes dotés d'une culture autochtone unique – sont touchées de façon majoritaire.

En 2018, l'ONG Global Forest Generation et l'association Ecosistemas Andinos ont lancé Acción Andina. Cette initiative vise à protéger et à restaurer un million d'hectares de forêts de polylepis dans les hautes Andes au cours des vingt prochaines années dans sept pays andins (Argentine, État plurinational de Bolivie, Chili, Colombie, Équateur, Pérou et République bolivarienne du Venezuela). La combinaison de savoirs traditionnels et de technologies modernes vise à restaurer les forêts, à garantir des réserves en eau ainsi qu'à protéger les espaces naturels et les écosystèmes, la biodiversité et la culture.

Plus de 6,5 millions d'arbres originaires de la région ont ainsi été plantés sur 3 359 hectares de forêts andines, auxquels s'ajoutent 11 253 hectares de forêts naturelles dans des zones protégées nouvelles ou réaménagées. Une plus grande résilience climatique et une plus grande sûreté des approvisionnements en eau ont permis d'améliorer l'habitat d'espèces autochtones tels le condor des Andes et l'ours à lunettes.

Source : FAO/PNUD (2023).

Encadré 6.4 Renforcer la résilience des montagnes : la restauration d'un bassin versant dans les montagnes du Pamir, en Afghanistan

Dans le bassin versant vulnérable d'un torrent au milieu des montagnes du Pamir, en Afghanistan, un ensemble d'interventions matérielles à petite échelle et de projets d'agroforesterie ou de restauration forestière a permis de protéger les communautés des glissements de terrain, des avalanches et d'autres aléas. Dirigées et mises en œuvre par les résidents locaux, ces mesures ont également contribué à renforcer la sûreté de l'approvisionnement en eau ainsi qu'à améliorer les moyens de subsistance dans la région. Les arbres fruitiers et à fruits à coque font partie des essences locales plantées, que les femmes locales cultivent afin de subvenir à leurs besoins (PNUE, 2021b).



Terrasses construites pour stabiliser les pentes et limiter l'érosion des sols

Photographie : © PNUE ; source : PNUE (2021b, p. 18).



Barrages de retenue, digues de terre et plantations d'arbres visant à stabiliser les pentes

Photographie : © PNUE ; source : PNUE (2021b, p. 22).



Parcelle boisée avec des coupes de troncs d'arbres pour protéger les terrains en pente

Photographie : © PNUE ; source : PNUE (2021b, p. 35).

Le rôle que jouent les communautés locales et leurs savoirs dans l'identification des besoins et la mise en œuvre de solutions est de plus en plus reconnu. Dans les páramos du centre de l'Équateur notamment, les efforts communautaires se sont avérés bien plus efficaces pour améliorer l'approvisionnement en eau des populations situées en aval du bassin que les mesures du Gouvernement équatorien axées sur la création de zones protégées (Torres et al., 2023).

Les solutions fondées sur la nature, notamment les adaptations écosystémiques, sont souvent associées à des interventions matérielles à petite échelle sur les infrastructures à la fois grises et vertes des régions montagneuses. À titre d'exemple, le creusement de terrasses sur les pentes des collines (voir section 3.1.2) en vue de réduire l'érosion et les glissements de terrain va souvent de pair avec la plantation d'arbres ce qui permet une amélioration générale (encadré 6.4). Ces solutions sont généralement accueillies avec enthousiasme par les communautés locales. Dans certains cas, des mesures incitatives supplémentaires (financières ou autres) contribuent à renforcer la participation de la communauté jusqu'à ce que les résultats de la restauration deviennent visibles et que la viabilité financière des moyens de subsistance locaux, grâce à la création de sources de revenus supplémentaires, augmente l'applicabilité des solutions fondées sur la nature (FAO/PNUE, 2023).

Des défis majeurs subsistent. Voici ceux qui ont été recensés par le Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch (ICIMOD, 2023) :

- Fortes variations au sein des écosystèmes et des cultures ; communautés locales dépendant fortement des ressources naturelles ; nécessité de mesures adaptées au contexte local avec des solutions fondées sur la nature axées sur des interventions conçues sur mesure à partir d'une compréhension respectueuse des écosystèmes.
- Plus d'études scientifiques sur les écosystèmes de montagne afin de mieux comprendre les liens complexes entre le changement climatique, la cryosphère, les écosystèmes et la société ; conservation d'un patrimoine commun à travers une coopération régionale.
- Manques de financement et lacunes en matière de politiques.
- Échanges et élaboration de bonnes pratiques trop limités.
- Surveillance et collecte de données insuffisantes.

• • •

Le rôle que jouent les communautés locales et leurs savoirs dans l'identification des besoins et la mise en œuvre de solutions est de plus en plus reconnu

Les lacunes en matière de savoir qui requièrent une attention particulière sont les suivantes : compréhension limitée des relations d'influence au niveau des espèces, des processus génétiques et des écosystèmes comme des effets du changement climatique sur celles-ci, compréhension des interactions entre le pergélisol, les pâturages extensifs, les zones humides et les tourbières, compréhension des risques liés au climat et leurs effets en cascade sur l'extinction des espèces et la réduction des aires de répartition (ICIMOD, 2023).

En ce qui concerne les sites industriels et contaminés, il faut mettre en place des stratégies fiables de planification à long terme, qui tiennent compte des effets du changement climatique afin d'éviter les risques environnementaux futurs liés à ces installations (Langer et al., 2023). De plus, on sait depuis des décennies qu'il faut davantage reconnaître l'importance de la pêche en haute altitude et en tenir compte dans les politiques, la gestion et les investissements (FAO, 2003).

Si elles dépendent des contextes et des lieux, les actions mises en œuvre ont pour points communs d'être facilitées par les mêmes catalyseurs, tels le soutien des communautés et les bénéfices mutuels, d'être rarement appliquées dans le contexte du changement climatique ou de la restauration des écosystèmes, et d'être faiblement coordonnées avec l'application des politiques nationales ou régionales (PNUE/GRID-Arendal, 2022).

Par conséquent, la restauration des écosystèmes de montagne doit tenir compte des éléments clés suivants : les populations locales, leur participation et leur autonomisation, la sexospécificité et le caractère inclusif des approches mises en œuvre, l'étude de la viabilité et la mobilisation des parties prenantes, la compréhension du contexte en termes d'écosystèmes et de moyens de subsistance, l'analyse des risques et de la vulnérabilité climatiques, la compréhension du rôle des services écosystémiques dans l'adaptation, l'élaboration d'une stratégie axée sur des solutions fondées sur la nature ou sur l'adaptation écosystémique et la conception de mesures concordantes, le suivi et l'évaluation à des fins d'enseignement, l'intégration des solutions fondées sur la nature et de l'adaptation écosystémique ainsi que la promotion des synergies (Swiderska et al., 2018).

« Le soutien résolu des gouvernements, de la société civile et du secteur privé est essentiel pour garantir et accroître des investissements appropriés en faveur de la nature, établir des liens entre les programmes politiques et les actions en faveur des montagnes, galvaniser la coordination régionale et mettre en œuvre l'initiative mondiale des Cinq ans d'action pour le développement des régions de montagne » (FAO/PNU, 2023, p. 47).

Références

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Alfthan, B., Gjerdi, H. L., Puikkonen, L., Andresen, M., Semernya, L., Schoolmeester, T. et Jurek, M. 2018. *Mountain Adaptation Outlook Series: Synthesis Report*. Nairobi/Vienne/Arendal, Norvège, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)/Centre GRID-Arendal. gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/:s_document/412/original/SynthesisReport_screen.pdf?1544437610.

Baruffol, M. 2020. « Andean 'Water Sponges': The Role of Plants in Water Supply ». Site web des Jardins botaniques royaux de Kew. www.kew.org/read-and-watch/paramos-andean-water-sponges.

Chaudhary, S., Chettri, N., Adhikari, B., Dan, Z., Gaire, N. P., Shrestha, F. et Wang, L. 2023. « Effects of a changing cryosphere on biodiversity and ecosystem services, and response options in the Hindu Kush Himalaya ». P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal et J. F. Steiner (éds), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Katmandou, Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD), p. 123 à 163. doi.org/10.53055/ICIMOD.1032.

Critchley, W., Harari, N. et Mekdaschi-Studer, R. 2021. *Restoring Life to the Land: The Role of Sustainable Land Management in Ecosystem Restoration*. Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD)/Panorama mondial des approches et technologies de conservation (WOCAT). www.unccd.int/sites/default/files/documents/2021-10/211018_RestoringLifetotheLand_Report%20%282%29.pdf.

Dangles, O., Rabaté, A., Kraemer, M., Zeballos, G., Soruco, A., Jacobsen, D. et Anthelme, F. 2017. « Ecosystem sentinels for climate change? Evidence of wetland cover changes over the last 30 years in the Tropical Andes ». *PLoS ONE*, vol. 12, n° 5, article e0175814. doi.org/10.1371/journal.pone.0175814.

Elsen, P. R., Monahan, W. B. et Merenlender, A. M. 2020. « Topography and human pressure in mountain ranges alter expected species responses to climate change ». *Nature Communications*, vol. 11, article 1974. doi.org/10.1038/s41467-020-15881-x.

Engstrom, C. B. et Quarmby, L. M. 2023. « Satellite mapping of red snow on North American glaciers ». *Science Advances*, vol. 9, n° 47. doi.org/10.1126/sciadv.adl3268.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 2003. *Mountain Fisheries in Developing Countries*. Rome, FAO. www.fao.org/3/y4633e/y4633e.pdf.

—. 2019. *Mountain Agriculture: Opportunities for Harnessing Zero Hunger in Asia*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/ca5561en/CA5561en.pdf.

—. 2022. *L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde – Des systèmes au bord de la rupture*. Rapport principal. Rome, FAO. doi.org/10.4060/cb9910en.

FAO/PNUE (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Rome/Nairobi, FAO/PNUE. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fu, B., Ouyang, Z., Shi, P., Fan, J., Wang, X., Zheng, H., Zhao, W. et Wu, F. 2021. « Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier ». *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese version)*, vol. 36, n° 11, p. 1298 à 1306. bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol36/iss11/5/.

Gidey, T., Oliveira, T. S., Crous-Duran, J. et Palma, J. H. N. 2020. « Using the yield-SAFE model to assess the impacts of climate change on yield of coffee (*Coffea arabica* L.) under agroforestry and monoculture systems ». *Agroforestry Systems*, vol. 94, n° 1, p. 57 à 70. doi.org/10.1007/s10457-019-00369-5.

Halbach, L., Chevrollier, L.-A., Doting, E. L., Cook, J. M., Jensen, M. B., Benning, L. G., Bradley, J. A., Hansen, M., Lund-Hansen, L. C., Markager, S., Sorrell, B. K., Tranter, M., Trivedi, C. B., Winkel, M. et Anesio, A. M. 2022. « Pigment signatures of algal communities and their implications for glacier surface darkening ». *Scientific Reports*, vol. 12, article 17643. doi.org/10.1038/s41598-022-22271-4.

ICIMOD (Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal et J. F. Steiner (éds)]. Katmandou, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

Jiang, C., Yang, Z., Wen, M., Huang, L., Liu, H., Wang, J., Chen, W. et Zhuang, C. 2021. « Identifying the spatial disparities and determinants of ecosystem service balance and their implications on land use optimization ». *Science of the Total Environment*, vol. 793, article 148472. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148472.

Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. et Wang, H. 2020. « A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere ». *Earth-Science Reviews*, vol. 210, article 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.

Kargel, J. S., Upadhyay, K., Maxwell, A., Ramos, A. G. M., Harrison, S., Shugar, D. H. et Haritashya, U. K. 2021. « Part I: Climate Change, Land Use Change, and Mountain Disasters ». Site web du Georgetown Journal of International Affairs. gjia.georgetown.edu/2021/08/23/part-i-climate-change-land-use-change-and-mountain-disasters/.

Langer, M., Schneider von Deimling, T., Westermann, S., Rolph, R., Rutte, R., Antonova, S., Rachold, V., Schultz, M., Oehme, A. et Grosse, G. 2023. « Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination ». *Nature Communications*, vol. 14, article 1721. doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4.

Lavorel, S., Colloff, M. J., Locatelli, B., Gordard, R., Prober, S. M., Gabillet, M., Devaux, C., Laforgue, D. et Peyrache-Gadeau, V. 2019. « Mustering the power of ecosystems for adaptation to climate change ». *Environmental Science & Policy*, vol. 92, p. 87 à 97. doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.010.

Luan, W. et Li, X. 2021. « Rapid urbanization and its driving mechanism in the Pan-Third Pole region ». *Science of the Total Environment*, vol. 750, article 141270. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141270.

Lutz, S., Anesio, A. M., Field, K. et Benning, L. G. 2015. « Integrated 'omics', targeted metabolite and single-cell analyses of Arctic snow algae functionality and adaptability ». *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, article 1323. doi.org/10.3389/fmicb.2015.01323.

Machate, O., Schmeller, D. S., Schulze, T. et Brack, W. 2023. « Review: Mountain lakes as freshwater resources at risk from chemical pollution ». *Environmental Sciences Europe*, vol. 35, article 3. doi.org/10.1186/s12302-022-00710-3.

Meredith, M., Sommerkorn, M., Cassotta, S., Derksen, C., Ekaykin, A., Hollowed, A., Kofinas, G., Mackintosh, A., Melbourne-Thomas, J., Muelbert, M. M. C., Ottersen, G., Pritchard, H. et Schuur, E. A. G. 2019. « Polar regions ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmonte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 203 à 320. doi.org/10.1017/9781009157964.005.

Mikuś, P., Wyżga, B., Bylak, A., Kukuła, K., Liro, M., Oglecki, P. et Radecki-Pawlak, A. 2021. « Impact of the restoration of an incised mountain stream on habitats, aquatic fauna and ecological stream quality ». *Ecological Engineering*, vol. 170, article 106365. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106365.

Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo Sánchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S. et Welton, S. 2017. *Cadre conceptuel scientifique relatif à la neutralité en matière de dégradation des terres. Un rapport de l'Interface Science-Politique*. Bonn, Allemagne, Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD). www.unccd.int/sites/default/files/documents/2019-06/LDN_CF_report_web-french_0.pdf.

Orr, B. J., Dosdogru, F. et Sánchez Santiváñez, M. 2024. « Land degradation and drought in mountains ». S. Schneiderbauer, P. Fontanella Pisa, J. F. Shroder et J. Szarzynski (éds), *Safeguarding Mountain Social-Ecological Systems*. Elsevier, p. 17 à 22. doi.org/10.1016/B978-0-12-822095-5.00003-6.

Palomo, I., Locatelli, B., Otero, I., Colloff, M., Crouzat, E., Cuni-Sánchez, A., Gómez-Bagethun, E., González-García, A., Grêt-Regamey, A., Jiménez-Aceituno, A., Martín-López, B., Pascual, U., Zafra-Calvo, N., Bruley, E., Fischborn, M., Metz, R. et Lavorel, S. 2021. « Assessing nature-based solutions for transformative change ». *One Earth*, vol. 4, n° 5, p. 730 à 741. doi.org/10.1016/j.oneear.2021.04.013.

Pintaldi, E., Hudek, C., Stanchi, S., Spiegelberger, T., Rivella, E. et Freppaz, M. 2017. « Sustainable soil management in ski areas: Threats and challenges ». *Sustainability*, vol. 9, n° 11, article 2150. doi.org/10.3390/su912150.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2021a. *Adaptation Gap Report 2020*. Nairobi, PNUE. www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020.

—. 2021b. *Mountain Resilience: Torrent Catchment Restoration in the Pamir Mountains of Afghanistan*. PNUE. wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/39982.

—. 2022a. *A Scientific Assessment of the Third Pole Environment*. Nairobi, PNUE. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment.

—. 2022b. *Global Peatlands Assessment – The State of the World's Peatlands: Evidence for Action toward the Conservation, Restoration, and Sustainable Management of Peatlands*. Rapport principal. Initiative mondiale pour les tourbières. Nairobi, PNUE. www.unep.org/resources/global-peatlands-assessment-2022.

—. 2024. *Caucasus Environment Outlook*. Deuxième édition. Arendal, Norvège/Tbilissi/Vienne, PNUE. www.unep.org/resources/report/caucasus-environment-outlook-second-edition.

PNUE/Centre GRID-Arendal (Programme des Nations Unies pour l'environnement/Centre GRID-Arendal). 2022. *Mountains ADAPT: Solutions from the South Caucasus*. Nairobi, PNUE. wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/39788#:~:text=This%20booklet%20showcases%20adaptation.

Repe, A. N., Poljanec, A. et Vrščaj, B. (éds). 2020. *Soil Management Practices in the Alps: A Selection of Good Practices for the Sustainable Soil Management in the Alps*. Ljubljana, Programme Interreg Espace alpin. www.alpine-space.eu/wp-content/uploads/2022/06/46-1-links4soils-Soil%20Management%20Practices%20in%20the%20Alps%20-%20a%20collection-output.pdf.

Scheidl, C., Heiser, M., Kamper, S., Thaler, T., Klebinder, K., Nagl, F., Lechner, V., Markart, G., Rammer, W. et Seidl, R. 2020. « The influence of climate change and canopy disturbances on landslide susceptibility in headwater catchments ». *Science of the Total Environment*, vol. 742, article 140588. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140588.

Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L. et Nettles, J. 2022. « The effects of forest management on water quality ». *Forest Ecology and Management*, vol. 522, article 120397. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397.

Swiderska, K., King-Okumu, C. et Monirul Islam, M. 2018. *Ecosystem-based Adaptation: A Handbook for EbA in Mountain, Dryland and Coastal Ecosystems*. Londres, Institut international pour l'environnement et le développement (IIED). www.iied.org/17460iied.

Teich, M., Accastello, C., Perzl, F. et Berger, F. 2022. « Protective forests for ecosystem-based disaster risk reduction (Eco-DRR) in the alpine space ». M. Teich, C. Accastello, F. Perzl et K. Kleemayr (éds), *Protective Forests as Ecosystem-based Solution for Disaster Risk Reduction (Eco-DRR)*. IntechOpen. doi.org/10.5772/intechopen.99505.

Tingley III, R. W., Paukert, C., Sass, G. G., Jacobson, P. C., Hansen, G. J. A., Lynch, A. J. et Shannon, P. D. 2019. « Adapting to climate change: Guidance for the management of inland glacial lake fisheries ». *Lake and Reservoir Management*, vol. 35, n° 4, p. 435 à 452. doi.org/10.1080/10402381.2019.1678535.

Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. et Carchipulla-Morales, D. 2023. « Social technology for the protection of the Páramo in the Central Andes of Ecuador ». *Mountain Research and Development*, vol. 43, n° 4, p. D1 à D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.

Wang, H., Wang, W. J., Liu, Z., Wang, L., Zhang, W., Zou, Y. et Jiang, M. 2022. « Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in Northeast China ». *Journal of Environmental Management*, vol. 315, article 115131. doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115131.

WWAP/ONU-Eau (Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau/ONU-Eau). 2018. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2018 : les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261466.

Xiao, Y., Xiao, Q. et Sun, X. 2020. « Ecological risks arising from the impact of large-scale afforestation on the regional water supply balance in Southwest China ». *Scientific Reports*, vol. 10, article 4150. doi.org/10.1038/s41598-020-61108-w.

Chapitre 7

Perspectives régionales

7.1 Afrique subsaharienne

WWAP et Bureau à Nairobi de l'UNESCO

Matthew England, Richard Connor, Alexandros Makarigakis et Mary Nyasimi

7.2 Europe et Asie centrale

CEE

Jos Timmerman¹ et Hanna Plotnykova²

Avec les contributions de Natalia Kruta (Agence de gestion des bassins versants du Bug occidental et du Sian) et Dinara Ziganshina (Centre d'information scientifique de la Commission inter-États pour la coordination de l'utilisation des ressources en eau de l'Asie centrale)

7.3 Amérique latine et Caraïbes

CEPALC

Silvia Saravia Matus, Alba Llavona, Lisbeth Naranjo, Natalia Sarmanto, Josefa Asmussen et Romeo Moers

7.4 Asie et Pacifique

CESAP

Hitomi Rankine et Anshuman Varma

Avec les contributions de Marisha Wojciechowska, Yi-Ann Chen, Sanjay Srivastava et Nadezhda Dimitrova (CESAP)

7.5 Région arabe

CESAO

Ziad Khayat, Marlene Ann Tomaszkiewicz, Sara Hess, Tracy Zaarour et Dima Kharbotli

¹ Waterframes ; ² Secrétariat de la Convention sur l'eau

7.1 Afrique subsaharienne

• • •
*Les montagnes
d'Afrique
subsaharienne
constituent une
source d'eau
fondamentale
pour les
communautés
montagnardes
et les usagers
installés en aval*

Onze pour cent des régions montagneuses du monde se trouvent en Afrique, soit une surface d'environ 1,5 million de km² (Alweny et al., 2014). Sur le continent, 20 % des terres émergées appartiennent à la catégorie des reliefs d'altitude supérieure à mille mètres au-dessus du niveau de la mer, dont 5 % dépassent une altitude supérieure à 1 500 mètres (FAO, 2015). L'Afrique de l'Est y est la région la plus montagneuse. Riches en biodiversité, ces régions montagneuses fournissent des services écosystémiques, notamment des ressources en eau, à des millions de personnes (Capitani et al., 2019 ; Trisos et al., 2022). En Afrique subsaharienne tropicale et subtropicale, les montagnes offrent des conditions environnementales plus favorables et des ressources plus avantageuses que les terres de basse altitude alentour généralement plus arides. Les montagnes constituent des zones de production agricole importantes pour la sécurité alimentaire (Romeo et al., 2020).

Cette section consacrée à l'Afrique subsaharienne se décline en quatre parties. La première présente les châteaux d'eau de la région, y compris leur importance hydrologique pour les communautés montagnardes et les usagers installés en aval. La deuxième partie aborde les défis liés à la durabilité des châteaux d'eau en termes de stockage et d'approvisionnement en eau, notamment la question des impacts anthropiques et le changement climatique. Un panorama des principes de gestion et des actions engagées est ensuite fourni, panorama qui révèle l'importance des écosystèmes forestiers de montagne pour la durabilité des châteaux d'eau. S'ensuivent des conclusions spécifiques à la région.

7.1.1 Quels châteaux d'eau en Afrique subsaharienne

Les montagnes d'Afrique subsaharienne (figure 7.1) constituent une source d'eau fondamentale pour les communautés montagnardes et les usagers installés en aval. Sur un continent majoritairement composé de zones arides et semi-arides, les montagnes servent de châteaux d'eau – générant, stockant et apportant de l'eau pour l'agriculture, les besoins domestiques et industriels, y compris la production hydroélectrique (Viviroli et al., 2007 ; 2020 ; PNUE, 2010 ; Nsengiyumva, 2019). Les montagnes sont d'une importance critique pour la sûreté de l'eau, de l'alimentation et de l'énergie sur l'ensemble de la région.

Les pluies orographiques déversent d'importantes quantités d'eau sur les montagnes africaines, provoquant des ruissellements de surface, des infiltrations, des écoulements et des réserves souterraines, voire un stockage de l'eau sous forme de neige et de glace de façon saisonnière ou sur de nombreuses années (OMM, 2024a). Dans les montagnes d'Afrique de l'Est, en République démocratique du Congo, au Kenya, en Ouganda et en République-Unie de Tanzanie, l'eau est stockée par les glaciers. Avant 2019, ces glaciers couvraient une superficie estimée à 4,4 km² (Veettil et Kamp, 2019), fournissant des flux saisonniers vers les bassins versants situés en aval. En Afrique australe, des chutes de neige saisonnières ont lieu sur les sommets des montagnes du Drakensberg, à la frontière entre le Lesotho et l'Afrique du Sud (Taylor et al., 2016). L'eau est ensuite acheminée des montagnes vers les basses terres en aval grâce aux ruissellements de surface, aux infiltrations et aux écoulements souterrains.

En Afrique, les châteaux d'eau alimentent de façon prépondérante les rivières et les bassins transfrontaliers du Congo, du Niger, du Nil, de l'Orange, du Sénégal, du Tana et du Zambèze. En Afrique de l'Est, les hauts plateaux éthiopiens alimentent le Nil Bleu qui, à son tour, contribue de façon non négligeable au débit annuel du Nil (Awange, 2022). En Afrique de l'Ouest, le plateau du Fouta Djallon est une source d'eau importante pour les fleuves Gambie, Niger et Sénégal (Descroix et al., 2020). Le plateau de Jos alimente de nombreux cours d'eau, dont la Bénoué, la Gongola, le Niger et d'autres rivières qui se déversent dans le lac Tchad. En Afrique australe, les hauts plateaux du Lesotho, y compris les montagnes du Drakensberg, constituent une source d'eau de premier ordre (PNUE, 2012). Le plateau angolais est, quant à lui, la principale source du delta de l'Okavango (Lourenco et Woodborne, 2023). Les châteaux d'eau d'Afrique sont aussi essentiels aux ressources en eau des basses terres, nécessaires

Figure 7.1

Les châteaux d'eau en Afrique

Note : sur cette carte de situation, le choix des couleurs est lié à l'altitude topographique, le marron et le jaune indiquant les plus basses altitudes, puis le vert jusqu'au blanc pour les plus hautes altitudes. Les zones bleues représentent l'eau à l'intérieur des carreaux cartographiés, chacun d'entre eux comprenant des rivages ou des îles.

Source : JPL (2004).



à un large éventail d'usagers. La production agricole et la sécurité alimentaire au sein des régions montagneuses comme des terres de plus basse altitude situées en aval dépendent largement des eaux de montagne (encadré 7.1).

7.1.2 Défis

La capacité des châteaux d'eau d'Afrique subsaharienne à accumuler, à stocker et à fournir de l'eau aux usagers en aval et aux communautés montagnardes se heurte à de nombreux défis, notamment en raison de l'intensification des activités humaines et des effets du changement climatique.

Dans les montagnes de la région, les taux de croissance démographique et les densités de population sont élevés ; la pauvreté y est largement répandue et il n'existe pas ou peu de moyens de subsistance alternatifs et résilients. En 2017, environ 252 millions de personnes vivaient dans les montagnes d'Afrique – soit 18 % de la population du continent¹⁵ et 23 % de l'ensemble de la population des régions montagneuses du monde. L'Afrique reste le deuxième continent montagneux le plus peuplé après l'Asie. Souvent, les montagnes y sont plus densément peuplées que les basses terres.

¹⁵ Sur les 18 millions de personnes vivant au-dessus de 2 500 mètres en Afrique en 2017, 17 millions se trouvaient sur les hauts plateaux d'Afrique de l'Est (Romeo et al., 2020).

Encadré 7.1 L'importance des châteaux d'eau de Madagascar pour l'agriculture

Si l'agriculture ne fournit qu'environ 20 % du produit intérieur brut de Madagascar, c'est environ 80 % de la population qui la pratique (Banque mondiale, 2023) pour obtenir des revenus et/ou des moyens de subsistance (Banque mondiale, s.d.). Environ 2,5 millions d'exploitations agricoles, majoritairement composées de petits exploitants, dépendent de l'irrigation continue du riz et d'autres cultures (FIDA, s.d.).

Dans les parties orientale et septentrionale de l'île, plusieurs sommets montagneux dépassent les 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer (Chaperon et al., 1993). Les parties supérieures boisées de ces montagnes absorbent les précipitations saisonnières et les libèrent lentement dans le bassin versant, permettant la subsistance des agriculteurs des basses terres et des établissements urbains.

Situé dans la réserve de Tsaratanana, le mont Maromokotro (2 876 m au-dessus du niveau de la mer) constitue la source de plusieurs grands cours d'eau. Le fleuve Sambirano irrigue les zones situées à l'ouest pour la production de cacao, de riz et de fruits, dont certaines des exportations agricoles les plus importantes de cette nation insulaire. Le fleuve Sofia forme un vaste bassin versant et est indispensable aux agriculteurs tandis que le massif isolé de la montagne d'Ambre, une zone protégée située à l'extrême nord, constitue la principale source d'eau potable pour près de 200 000 personnes vivant à Antsiranana (Goodman et al., 2021) comme pour l'agriculture dans la région alentour.

Les forêts protégées constituent des zones tampons contre les effets destructeurs des cyclones et d'autres catastrophes naturelles. Il n'en reste pas moins que le couvert forestier de Madagascar a diminué de 29 % entre 2001 et 2023 (Global Forest Watch, s.d.). Les changements dans le climat et l'emploi des terres (exacerbés par la croissance démographique) menacent l'avenir des ressources forestières du pays et de leur biodiversité, qui requièrent une protection accrue au travers notamment de projets de conservation.

En 2017 toujours, on estime que l'insécurité alimentaire touchait 132 millions de personnes vivant en zone rurale dans les régions montagneuses d'Afrique, soit deux personnes vivant en zone rurale sur trois. Il s'agit de la proportion la plus élevée de toutes les régions montagneuses continentales du monde (Romeo et al., 2020).

Or, les écosystèmes montagneux se dégradent, ce qui réduit leur capacité à stocker et à fournir de l'eau en aval. La destruction de forêts de montagne d'une importance cruciale en est un exemple frappant. La dégradation des terres (sols) provoquée par un usage inapproprié et par certaines pratiques agricoles, dont le surpâturage du bétail, s'avère également préjudiciable (Ariza et al., 2013 ; Romeo et al., 2020). L'exploitation minière non durable à grande échelle a également accéléré la dégradation des terres et l'appauvrissement des écosystèmes. Parmi les habitants des zones rurales dans les régions montagneuses d'Afrique touchées par l'insécurité alimentaire en 2017, 86 millions vivaient dans des zones où la dégradation des sols a des conséquences néfastes sur les moyens de subsistance agricoles (Romeo et al., 2020). L'absence de surveillance et de données hydrométéorologiques détaillées entrave considérablement la compréhension de l'urgence qu'il y a à restaurer des zones forestières à leur état primaire.

Les impacts du changement climatique aggravent les difficultés que pose la gestion de la variabilité saisonnière des précipitations en Afrique subsaharienne (Trisos et al., 2022 ; OMM, 2022). Les projections pour le continent, notamment pour les régions montagneuses, font état d'une augmentation de la variabilité des précipitations aux échelles interannuelle et annuelle, des hausses de température et d'une fonte des glaciers. Tous les scénarios d'évolutions dues au changement climatique annoncent une amplification progressive de la variabilité hydrologique extrême (Trisos et al., 2022). D'ici à 2050, jusqu'à 921 millions de personnes installées en Afrique subsaharienne pourraient être exposées à un stress hydrique lié au changement climatique (Dickerson et al., 2021). Il faut également s'attendre à ce que les inondations, les sécheresses et d'autres catastrophes naturelles se multiplient tant dans

• • •

La survenue et le niveau des précipitations de montagne revêtent une importance capitale pour la pérennité des châteaux d'eau d'Afrique subsaharienne

les montagnes de la région qu'en aval de celles-ci. En outre, la fréquence des glissements de terrain manifeste des tendances à la hausse dans les régions montagneuses d'Afrique (Adler et al., 2022). Il est avéré que les catastrophes naturelles dues aux sécheresses, aux organismes nuisibles et aux changements des régimes pluviométriques ont des répercussions négatives sur les moyens de subsistance des petits exploitants agricoles (Shikuku et al., 2017).

Les montagnes d'Afrique de l'Est ont été le théâtre de fontes de glaciers (Trisos et al., 2022), entraînant une perte de masse estimée à 80 % entre 1990 et 2015 (Communauté de l'Afrique de l'Est/PNUE/Centre GRID-Arendal, 2016). La surface glaciaire totale du mont Kenya a diminué notamment de 44 % entre 2004 et 2016 (Prinz et al., 2016) tandis que celle du mont Kilimandjaro est passée de 4,8 km² en 1984 à 1,7 km² en 2011 (Cullen et al., 2013) et que celle des monts Rwenzori est passée de 2 km² en 1987 à environ 1 km² en 2003 (Taylor et al., 2016). La diminution de la surface glaciaire est liée à l'augmentation des températures de l'air et, dans le cas du mont Kenya et du mont Kilimandjaro, à la diminution des précipitations et de l'humidité atmosphérique (Veettil et Kamp, 2019). Avant 2030, les glaciers du mont Kenya et des monts Rwenzori devraient disparaître et d'ici à 2040, ceux du mont Kilimandjaro (Trisos et al., 2022).

En Afrique de l'Est, les répercussions de la disparition des glaciers sur les ressources en eau devraient s'avérer minimales (Taylor et al., 2009 ; Adhikari et al., 2015 ; Veettil et Kamp, 2019) à l'échelle régionale (macro), car l'eau des glaciers contribue relativement peu aux débits totaux des rivières. Dans les monts Rwenzori, situés entre la République démocratique du Congo et l'Ouganda par exemple, les glaciers apportent moins de 2 % du débit total des principaux cours d'eau lors des saisons sèches et humides (Taylor et al., 2009). Cependant, des répercussions saisonnières ponctuelles sur les ressources en eau ont pu être observées. Par exemple, de nombreux canaux situés dans les contreforts du mont Kilimandjaro se sont asséchés dans le même temps que les niveaux d'eau des cours d'eau ont diminué, donnant naissance à des conflits locaux pour l'accès à l'eau (Gagné et al., 2014).

La survenue et le niveau des précipitations de montagne revêtent une importance capitale pour la pérennité des châteaux d'eau d'Afrique subsaharienne. Les précipitations sont en effet stockées dans les montagnes et fournies par celles-ci étant donné que les eaux de surface, les rivières et les flux d'eaux souterraines s'écoulent vers les basses terres situées en aval. À l'échelle régionale, les précipitations ont une importance volumétrique supérieure à la fonte des glaciers pour l'écoulement des rivières en aval en Afrique de l'Est. Les quelques études consacrées aux prédictions de précipitations spécifiques aux régions montagneuses estiment que l'Afrique de l'Est devrait recevoir 5 à 20 % de précipitations annuelles supplémentaires au cours du XXI^e siècle, même si celles-ci sont moyennement fiables (Adler et al., 2022). Pour le reste, dans les autres régions du continent, les prédictions de précipitations établies pour divers scénarios du changement climatique annoncent une augmentation de la variabilité interannuelle et annuelle, différente pour chaque sous-région (Trisos et al., 2022).

Une étude s'est penchée sur la manière dont le changement climatique (en faisant varier les précipitations) et l'emploi des sols génèrent des ruissellements d'eau dans neuf châteaux d'eau d'Afrique de l'Est. Les résultats indiquent que ces ruissellements sont plus sensibles au changement climatique (précipitations) qu'à un changement d'emploi des sols. Toutefois, dans les zones de basses terres situées en aval, la modification de l'emploi des sols a eu plus de répercussions sur les ruissellements d'eau que le changement climatique. Les châteaux d'eau de la région ont été exposés à des conditions beaucoup plus humides, en particulier au cours de la période 2011-2019, alors que le niveau d'évapotranspiration potentielle a progressivement augmenté. Compte tenu de la faible résilience de la plupart des châteaux d'eau à ces changements ainsi qu'établi, il est probable que les ruissellements d'eau à l'avenir connaissent aussi des variations plus extrêmes (Wamucii et al., 2021).

• • •

Le changement climatique devrait amplifier la variabilité saisonnière des précipitations, déjà historiquement élevée en Afrique subsaharienne

7.1.3 Actions

De nombreuses actions ont été présentées pour promouvoir une gestion durable de l'eau en montagne en réponse au changement climatique comme à l'intensification des activités anthropiques (Adler et al., 2022 ; Trisos et al., 2022).

Étant donné que l'agriculture constitue le principal moyen de subsistance dans les montagnes d'Afrique subsaharienne, il est essentiel d'améliorer les pratiques agricoles afin de réduire la dégradation des terres et de promouvoir la conservation des sols (Romeo et al., 2020). Le recours à des mesures d'adaptation écosystémique (le reboisement et la protection des forêts de montagne pour lutter contre l'érosion des sols par exemple) peut améliorer la rétention d'eau et la recharge des aquifères tout comme réduire les risques de catastrophes naturelles (Alweny et al., 2014 ; Nsengiyumva, 2019).

Compte tenu du grand nombre de rivières transfrontalières alimentées par des châteaux d'eau en Afrique, la promotion de la coopération transfrontière pour les eaux de surface et les eaux souterraines entre riverains constitue une stratégie efficace afin de promouvoir un partage équitable des bénéfices sur le continent (ONU, 2024).

Importance des écosystèmes forestiers pour les châteaux d'eau en Afrique subsaharienne

L'intérêt porté aux châteaux d'eau s'est d'abord focalisé sur les montagnes glaciaires, où la température constitue un facteur clé pour déterminer les ruissellements d'eau provenant des chaînes de montagnes glaciaires (Immerzeel et al., 2020). Les montagnes couvertes de bois et d'autres types de végétation, telle l'herbe, fournissent des services similaires (Viviroli et Weingartner, 2004). Les forêts de montagne peuvent capter, stocker, purifier et relâcher de l'eau vers les basses terres (PNUE, 2014).

Les châteaux d'eau d'Afrique de l'Est possèdent de vastes écosystèmes forestiers montagneux. On pense notamment du rift Albertin, aux hauts plateaux éthiopiens et aux hauts plateaux kenyans (Wamucii et al., 2021). Ces forêts se caractérisent par leur altitude et leur humidité élevées ; elles accumulent, stockent et fournissent de l'eau aux basses terres (PNUE, 2010). Les forêts de montagne atténuent les inondations et les sécheresses, préviennent l'érosion des sols, préservent la qualité de l'eau, augmentent l'infiltration des eaux souterraines et influencent le microclimat en leur sein et aux alentours (Mwangi et al., 2020).

Les châteaux d'eau du Kenya se caractérisent par des forêts de montagne situées dans les parties supérieures des bassins versants de la chaîne d'Aberdare, des collines de Cherangani, du complexe forestier de Mau, du mont Elgon et du mont Kenya. Il s'agit de ressources naturelles inestimables qui contribuent à l'approvisionnement en eau, la production d'énergie, l'économie agraire ainsi qu'à la préservation et à la conservation de la biodiversité du pays (Kiplagat et al., 2011 ; Nyangi et al., 2013 ; Kanui et al., 2016 ; Ontumbi et Sanga, 2018 ; Schmitz, 2020 ; Takase et al., 2021).

De nombreuses rivières du Kenya prennent leur source dans les montagnes boisées qui fournissent environ 75 % des ressources en eau du pays employées pour l'irrigation, les besoins industriels et la production hydroélectrique (qui génère 60 % de l'électricité du Kenya). Toutefois, ces forêts subissent des dégradations du fait d'établissements humains non planifiés, du surpâturage, de la déforestation et de la conversion de terrains forestiers en terres agricoles. La forêt de Mau par exemple, à savoir l'un des plus grands bassins hydrographiques du Kenya, a perdu environ un quart de sa couverture forestière entre 2000 et 2020. Une telle déforestation menace la biodiversité et perturbe également les services écosystémiques que ces forêts fournissent. Les collines de Cherangani et le mont Elgon connaissent également une dégradation similaire qui contribue à l'aggravation du problème (Mwangi et al., 2020).

7.2 Europe et Asie centrale

Les efforts de protection et de restauration de ces châteaux d'eau primordiaux comprennent des pratiques de gestion durable des forêts, des projets de reboisement et des mesures politiques qui s'attaquent aux causes sous-jacentes de la déforestation telles que la pauvreté et les problèmes fonciers. L'élargissement de la participation, le transfert de connaissances et le renforcement des capacités des parties prenantes comme le ciblage de chaînes de valeur spécifiques (maïs, thé et bétail par exemple) en vue de promouvoir la résilience des moyens de subsistance font partie des mesures défendues (Mwangi et al., 2020). L'implication des communautés locales (y compris les femmes, les jeunes et les populations autochtones) dans les efforts de conservation et de promotion de moyens de subsistance alternatifs peut également contribuer à la réduction de la pression exercée sur ces forêts (Kennedy et al., 2023).

7.1.4 Conclusions

Cette section a permis de montrer l'importance des châteaux d'eau d'Afrique subsaharienne pour les communautés montagnardes et les usagers installés en aval. Afin que ceux-ci perdurent dans la région, la protection et la réhabilitation des forêts, des sols et d'autres services écosystémiques connexes revêtent une importance capitale. Le changement climatique devrait amplifier la variabilité saisonnière des précipitations, déjà historiquement élevée en Afrique subsaharienne. Par conséquent, il devient d'autant plus important de mettre en place des mesures qui apportent des bénéfices mutuels à toutes les parties (notamment des mesures autonomes à faible risque et quasi sans regret) dans le but de s'adapter à la saisonnalité et d'amortir les impacts écologiques des humains sur les montagnes afin de préserver l'approvisionnement fourni par ces châteaux d'eau.

En Europe et en Asie centrale, de nombreux cours d'eau trouvent leur source dans les chaînes de montagnes. La fonte des neiges et des glaciers alpins génère un lent écoulement d'eau douce vers les zones en aval. Cependant, du fait du changement climatique, la fonte saisonnière de la neige est plus précoce et les glaciers sont plus petits, rendant moins certaine la disponibilité des ressources en eau pendant l'été. Cette situation est lourde de conséquences pour les populations des bassins en contrebas.

En Amérique du Nord par exemple, le fleuve Colorado apporte de l'eau à environ 40 millions de personnes et tire la majeure partie de son débit des chutes de neige sur les Rocheuses. Déjà mis à l'épreuve par des prélèvements excessifs, le bassin hydrographique est en proie à la sécheresse depuis l'an 2000. La situation pourrait même empirer en raison de l'élévation des températures causant davantage de précipitations sous forme de pluies qui tendent à s'écouler plus rapidement que la neige des montagnes (Robbins, 2019).

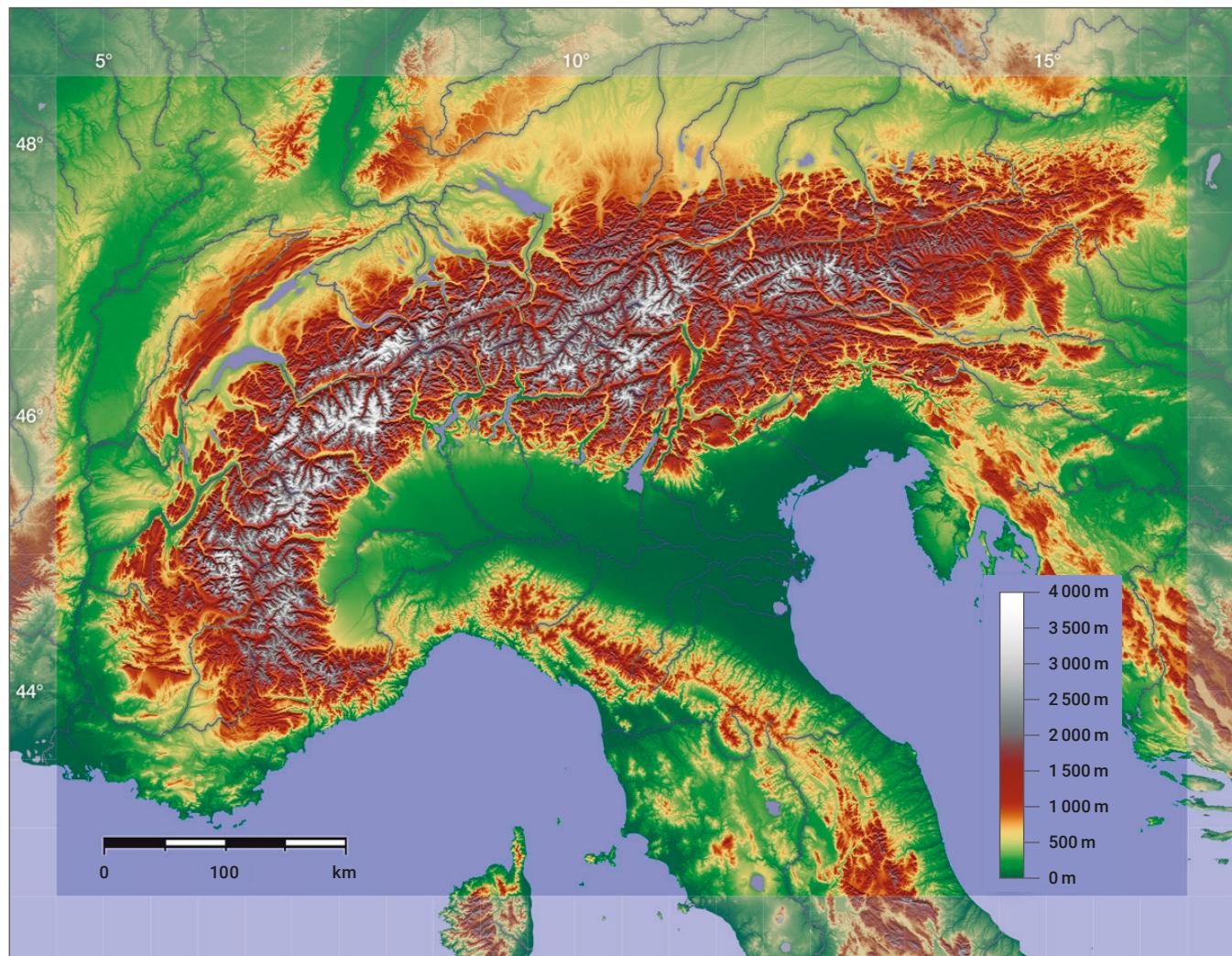
Les montagnes constituent des zones importantes sur le plan social et écologique. Elles sont soumises à de nombreuses pressions anthropiques qui affectent également l'hydrologie de la région et, par conséquent, la disponibilité de l'eau dans les régions en aval. Il est donc nécessaire d'agir afin de prévenir la dégradation des montagnes, de préserver leur valeur sociale et écologique comme leur fonction de châteaux d'eau. Compte tenu de l'étendue des chaînes de montagnes sur plusieurs pays, une gestion adéquate ne peut être mise en place que grâce à une coopération entre les pays. Les paragraphes suivants décrivent ces problématiques à travers les cas de plusieurs chaînes de montagnes au sein de la région de la Commission économique pour l'Europe¹⁶.

¹⁶ La Commission économique des Nations Unies pour l'Europe comprend cinquante-six États membres en Europe, en Amérique du Nord et en Asie (unece.org/member-states).

7.2.1 Les Alpes

Les Alpes s'étendent sur huit pays, nommément l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, le Liechtenstein, Monaco, la Slovénie et la Suisse, et quatre grands fleuves, le Danube, le Pô, le Rhin et le Rhône, y prennent leur source (figure 7.2). Les ressources en eau des Alpes revêtent une importance capitale pour une grande partie de l'Europe (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2009a).

Figure 7.2 Carte topographique des Alpes



Note : mètres au-dessus du niveau de la mer.

Source : Ghosh (2021).

Les écosystèmes et la biodiversité alpins sont indispensables à la santé des ressources en eau. Les changements d'emploi des terres entraînent une réduction de la taille des habitats des espèces ainsi que leur fragmentation tandis que le changement climatique exerce une pression sur les espaces naturels, provoquant la dégradation de ces habitats et la disparition d'espèces, et exacerbant la pression sur les ressources en eau (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2009a). Les effets du changement climatique sur la cryosphère et l'hydrosphère des Alpes devraient entraîner une diminution du débit annuel des cours d'eau ; plus précisément, on s'attend à ce que les ruissellements des parties couvertes de glace diminuent de 45 % et que les ruissellements totaux diminuent de 35 % par rapport à 2006. Ceci aura des répercussions importantes sur la quantité et la qualité des eaux en aval, et par extension sur la production hydroélectrique, l'agriculture, la sylviculture, le tourisme et les écosystèmes aquatiques (Laurent et al., 2020).

• • •

Les ressources en eau des Alpes revêtent une importance capitale pour une grande partie de l'Europe

Les prélèvements d'eau dans les Alpes sont principalement destinés à la production hydroélectrique mais servent aussi à des fins industrielles, à l'irrigation agricole et à la fabrication de neige artificielle. Ces activités sont à l'origine d'altérations morphologiques ; de fait, 16 des 50 masses d'eau existantes risquent de ne pas être dans un état écologique pouvant être jugé bon en 2027 (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2009b).

Il s'avère indispensable de soutenir et d'encourager la gestion intégrée des risques de catastrophe naturelle et la détection précoce des risques naturels liés au changement climatique, tels les avalanches, les inondations, les coulées de boue et les glissements de terrain. La fabrication de neige artificielle pourrait constituer une stratégie d'adaptation importante dans l'optique de stimuler le tourisme hivernal et de réduire la fonte des glaciers, mais elle peut entraîner des conflits d'utilisation entre les exploitants des systèmes d'enneigement, d'un côté, et les foyers et autres usagers de l'eau de l'autre côté. Il serait préférable d'éviter cette fabrication, en particulier près des habitats sensibles sur le plan écologique et menacés. À l'échelle locale, des bâches isolantes ont parfois été utilisées pour lutter contre la fonte des glaciers (encadré 7.2) (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2009a ; Jorio et Reusser, 2019).

Encadré 7.2 Protéger les glaciers par des bâches isolantes

Depuis plus de dix ans, le glacier du Rhône, situé dans le canton du Valais en Suisse, est recouvert de bâches blanches destinées à le protéger des rayons du soleil. L'objectif est de préserver la grotte de glace, qui constitue l'une des grandes attractions touristiques des Alpes. Cette mesure possède une utilité concrète à petite échelle puisque l'objectif est de ralentir la fonte au niveau local pour des raisons économiques. Elle n'est en revanche pas pensée pour sauver l'ensemble d'un glacier, étant donné que les coûts dépasseraient rapidement les avantages financiers. On estime qu'il faudrait entre 10 et 100 millions d'euros par an pour recouvrir l'ensemble du glacier (Jorio et Reusser, 2019).



Toiles de protection sur le glacier du Rhône

Photographie : © Zoltan Major/Shutterstock*.

La Convention alpine a été adoptée par les huit pays des Alpes en 1991 avec, pour objectif, le développement durable et la protection de l'ensemble de cette chaîne de montagnes. Dans ce cadre, des rapports sur l'état des Alpes sont publiés régulièrement afin de contribuer activement aux discussions sur leur développement écologique, économique et social. Pour le septième rapport, la Plate-forme Risques naturels de la Convention alpine (PLANALP) a préparé une analyse de la situation et des recommandations destinées à améliorer la gestion des risques en examinant comment évoluent les manières dont la société affronte les risques de catastrophes naturelles. À l'avenir, la fréquence des risques naturels, tels les chutes de pierres, la déstabilisation des langues de glaciers, les vidanges brutales de lacs glaciaires et les avalanches de glace et de roches associées au recul des glaciers et du pergélisol (voir section 2.2.3), devrait augmenter (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2019). La Convention alpine a également mis au point un Plan d'action climat 2.0 dans l'optique de parvenir à une neutralité et une résilience climatiques dans les Alpes d'ici à 2050, ce qui constituerait une façon significative de protéger le milieu montagneux et de réduire la fonte des glaciers (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2022).

La Commission internationale pour la protection du Rhin, par l'intermédiaire de la Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin, effectue un suivi des glaciers qui alimentent le Rhin. Dans le cadre de ses travaux de mise à jour de sa stratégie d'adaptation au changement climatique, elle a souligné que la quantité d'eau de fonte des neiges et des glaciers qui stabilise le débit du Rhin en période d'étiage devrait diminuer en raison du changement climatique et que la restauration des systèmes hydriques naturels telles les forêts, les zones humides et les plaines d'inondation sur le Rhin et dans son bassin hydrographique constitue une nécessité (CHR, 2022 ; CIPR, 2022).

7.2.2 Les Carpates

La région des Carpates se répartit entre la Hongrie, la Pologne, la Roumanie, la Serbie, la Slovaquie, la Tchéquie et l'Ukraine. Trente pour cent de la flore européenne se trouvent dans les Carpates où vivent les plus grandes populations européennes d'ours bruns, de loups, de lynx, de bisons d'Europe et d'espèces d'oiseaux rares. La présence d'habitats semi-naturels tels que les pâturages de montagne et les prairies de fauche leur confère une grande importance écologique et culturelle. La région fournit d'importants biens et services écosystémiques, tels la nourriture, l'eau potable, les produits forestiers et le tourisme. Elle comprend trois grands bassins hydrographiques : le Danube et le Dniestr, qui se jettent dans la mer Noire, et la Vistule, qui se jette dans la mer Baltique (PNUE, 2023a ; Climate-ADAPT, 2024).

L'abandon des terres, la modification et la fragmentation des habitats, la déforestation comme les méthodes d'exploitation forestière et agricole non durables entraînent une augmentation des ruissellements ainsi que de l'érosion, et menacent la biodiversité au sein des montagnes. L'agriculture constitue la principale source de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines (Climate-ADAPT, 2024). Le changement climatique entraîne une hausse des températures ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur estivales. Les régimes de précipitations sont, eux, amenés à changer. D'une part, il y aura moins de précipitations en été, ce qui entraînera une réduction du débit des rivières et une augmentation des pénuries d'eau ; d'autre part, les précipitations seront plus intenses et de courte durée, avec des risques accrus d'inondations, d'érosion et de glissements de terrain, affectant les moyens de subsistance et les établissements humains. Les périodes de neige se raccourciront, ce qui devrait réduire le tourisme hivernal local mais prolonger la pousse végétale pour l'agriculture. La fonte précoce des neiges réduira le débit des rivières, l'approvisionnement en eau potable en été et la recharge des nappes phréatiques tout en augmentant les risques d'incendies de forêt (Alberton et al., 2017).

• • •

Trente pour cent de la flore européenne se trouve dans les Carpates

L'invasion massive de l'Ukraine par la Fédération de Russie a entraîné des conséquences dramatiques pour la région des Carpates. Elle met sérieusement à l'épreuve les ressources naturelles du fait de la pollution due produite par la destruction des infrastructures (notamment le déversement de produits pétroliers dans les bassins du Dniestr et de la Vistule à la suite d'attaques militaires contre des dépôts pétroliers et des stations électriques [Shumilova et al., 2023 ; Agence de gestion des bassins hydrographiques du Dniestr, 2024 ; Agence de gestion des bassins versants du Bug occidental et du Sian, non publié]). Les forêts sont également touchées par l'augmentation de la consommation de bois de chauffage entraînée par les perturbations de l'approvisionnement en combustibles liquides et en électricité, ce qui accroît les risques d'inondation. La guerre pose également des difficultés majeures à la gestion des zones protégées, du fait notamment d'une réduction considérable des financements destinés à la protection de la nature et d'une réduction en personnel causée par la mobilisation militaire (Ministère polonais du climat et de l'environnement, 2022 ; PNUE, 2022a).

Afin de garantir la durabilité des ressources naturelles, il s'avère nécessaire d'intégrer davantage l'organisation de l'emploi des terres à la gestion de l'eau. Pour ce faire, il faut protéger les écosystèmes, accorder une plus grande attention à la rétention d'eau dans les sols et au stockage de celle-ci, collecter les eaux de pluie, prévenir l'érosion de surface, en particulier sur les terrains agricoles, comme la dégradation des forêts et adapter la gestion des infrastructures hydrauliques existantes. Il convient également de renforcer la prévention comme la préparation aux inondations et aux glissements de terrain, notamment par l'élaboration de cartes des zones d'inondation et de cartes rassemblant les zones à risque. Les pays des Carpates ont intégré un grand nombre de ces mesures dans leurs stratégies environnementales nationales (Alberton et al., 2017).

La Convention-cadre sur la protection et le développement durable des Carpates (Convention des Carpates) – un accord environnemental multinational entre les sept pays des Carpates qui est entré en vigueur en 2003 – a pour objectif de protéger le patrimoine naturel et culturel de la région des Carpates ainsi que de promouvoir le développement durable. Les acteurs locaux et les représentants des communautés peuvent participer aux réunions de la Convention en tant qu'observateurs. Leur participation est aussi sollicitée lors de la « Journée des Carpates », organisée conjointement avec la Conférence des parties à la Convention des Carpates. Cette dernière a permis, par exemple, la création d'un site Ramsar transfrontalier dans le parc national de la gorge de Đerdap (Porte de fer) et une amélioration de la protection des forêts de montagne. L'adaptation au changement climatique est désormais également incluse dans d'autres domaines politiques tels que la gestion de l'emploi des terres, l'agriculture et le tourisme (PNUE, 2023a ; Climate-ADAPT, 2024).

La Convention des Carpates travaille en étroite collaboration avec la Commission internationale pour la protection du Danube (Commission internationale pour la protection du Danube, 2014). On peut citer en exemple une étude sur l'adaptation climatique du Danube (Université Louis-et-Maximilien de Munich, 2018) qui inclut les répercussions du changement climatique dans les Carpates de même que le Plan de gestion des risques d'inondation du Danube (Commission internationale pour la protection du Danube, 2021) inclut des mesures de gestion des risques d'inondation dans les Carpates, qui sont ensuite transformées en actions de mise en œuvre par les pays au niveau national.

Les activités de la Commission pour l'utilisation et la protection durables du bassin du Dniestr (Commission du Dniestr) prennent également en compte la situation des Carpates. Son Groupe de travail sur les écosystèmes et la biodiversité par exemple accorde une attention particulière à la région des Carpates au travers de mesures de

• • •

Les montagnes d'Asie centrale constituent une source majeure d'eau pour la production hydroélectrique et industrielle, l'irrigation et l'eau potable

protection et d'accroissement des ressources forestières comme des petites rivières afin d'améliorer le stockage de l'eau (Commission du Dniestr, 2024a). Son Groupe de travail sur les situations d'urgence a, quant à lui, recensé plusieurs zones prioritaires dans les Carpates et procédé à une modélisation et une cartographie des risques d'inondation, suivies par l'élaboration de plans de gestion des risques d'inondation, conformément à la Directive de l'Union européenne (2007/60/CE) relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (Commission du Dniestr, 2024b).

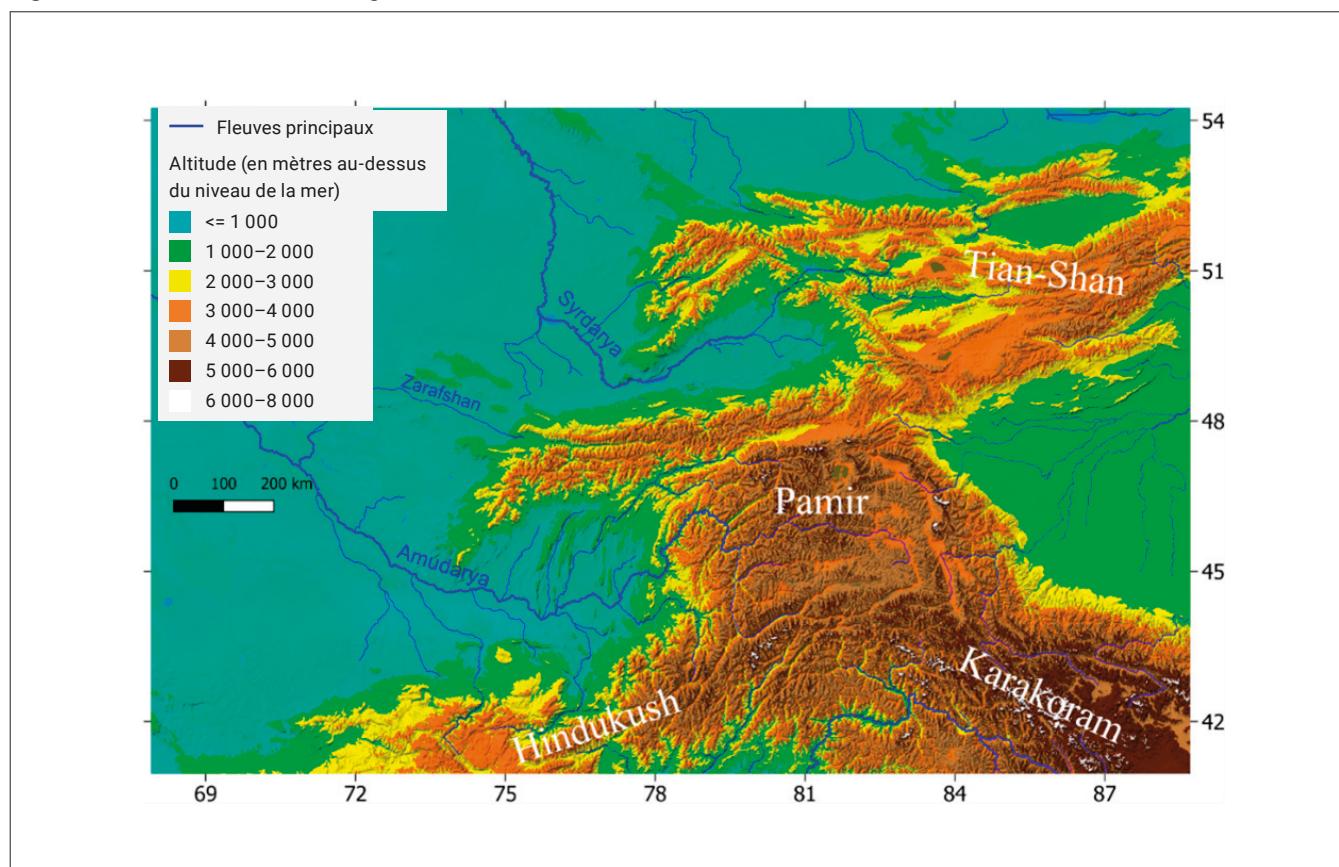
7.2.3 L'Asie centrale

Les montagnes d'Asie centrale comprennent les chaînes du Pamir et du Tian Shan qui couvrent des parties de l'Afghanistan, de la Chine, du Kazakhstan, du Kirghizistan, de l'Ouzbékistan et du Tadjikistan (figure 7.3) ainsi que la chaîne du Karakoram, qui s'étend sur la Chine, l'Inde et le Pakistan. Des glaciers se trouvent dans ces montagnes qui constituent des écosystèmes fragiles et sont précieuses pour l'identité sociale et culturelle de leurs habitants. La chaîne du Tian Shan est connue pour être le château d'eau de l'Asie centrale. Les montagnes d'Asie centrale constituent une source majeure d'eau pour la production hydroélectrique et industrielle, l'irrigation et l'eau potable. Plus de 60 millions de personnes vivent dans le bassin de la mer d'Aral, qui couvre une grande partie de la région. Jusqu'à 90 % du total des prélevements d'eau qui y sont effectués sont destinés à l'agriculture (Alford et al., 2015).

Le Kirghizistan et le Tadjikistan sont fortement dépendants de la production hydroélectrique, générant 90 % de l'électricité utilisée par les deux pays qui, se trouvant en amont, sont confrontés à des pénuries d'énergie en hiver et aimeraient accroître leur production hydroélectrique (Zandi, 2023). Les pays qui se trouvent en aval, tels le Kazakhstan, le Turkménistan et l'Ouzbékistan, sont largement tributaires de l'eau des montagnes pour leur production agricole en été. Notamment, 80 % du débit de l'Amou-Daria et 74 % du débit des eaux du Syr-Daria, deux rivières qui fournissent, à elles deux, 90 % de l'eau fluviale de l'Asie centrale, prennent leur source dans les montagnes du Kirghizistan et du Tadjikistan (Russell, 2018). Ces demandes saisonnières conflictuelles entraînent des tensions politiques entre pays riverains (Pohl et al., 2017 ; CAWater-info, s.d.). Un accord entre le Kirghizistan et l'Ouzbékistan ratifié en 2021, et en vertu duquel la fourniture d'eau se fait en échange d'électricité, a fait progresser la coopération (Climate Diplomacy, 2022).

Les écosystèmes de montagne jouent un rôle essentiel dans la régulation des débits et des approvisionnements. Par exemple, les zones de végétation, telles les forêts, retiennent l'eau puis la libèrent lentement sous forme d'eaux de surface ou d'eaux souterraines. La suppression des forêts est parfois à l'origine d'une grave érosion des sols : la fonction de régulateur d'eau tenue par la forêt est alors perdue et les risques d'inondation augmentent (Stecher et al., 2023). Les écosystèmes des montagnes d'Asie centrale sont perturbés par la pollution, la fragmentation et la dégradation des habitats ainsi que par le changement climatique. La conservation des habitats naturels se heurte à des défis supranationaux et multidimensionnels qui compliquent la réglementation et la mise en œuvre efficace de politiques à l'échelle d'un pays (Van der Graaf et Siarova, 2021 ; Zoï Réseau environnemental, 2022). Dans le but de préserver les écosystèmes fragiles des zones montagneuses de la région d'Asie centrale, la Commission inter-États pour le développement durable en Asie centrale a vu le jour en 1994. Elle s'est fixé pour objectif d'accroître la coopération régionale en matière de conservation et d'exploitation durable des régions montagneuses d'Asie centrale, notamment par un renforcement du cadre institutionnel permettant une telle coopération sur les écosystèmes de montagne (Mosello et al., 2023).

Figure 7.3 Les chaînes de montagnes du Tian Shan et du Pamir en Asie centrale



Source : Umirbekov et al. (2022, fig. 1, p. 4).

En Asie centrale, le changement climatique entraîne une hausse des températures moyennes et une fonte généralisée des glaciers situés dans la région. Les précipitations annuelles moyennes sont en augmentation tout comme augmente leur variabilité interannuelle et celle des ruissellements associés, ce qui peut entraîner des inondations en hiver et des sécheresses hydrologiques en été. Cette augmentation a exercé une pression sur le fonctionnement des centrales hydroélectriques, l'approvisionnement en eau potable et la production agricole (PNUD/Initiative ENVSEC, 2011 ; Sorg et al., 2012). Le manque de savoirs et de données relatives aux ressources naturelles, le manque de coopération institutionnelle, l'éparpillement des responsabilités et le manque de financements tendent à retarder l'adoption de mesures efficaces (GIZ, 2023).

Des solutions techniques telles que le recouvrement de la glace par des bâches isolantes (encadré 7.2) comme dans les Alpes ou la fabrication de neige artificielle pour protéger la glace et limiter le ruissellement ont été proposées en vue de préserver les glaciers (Travers, 2023). Cependant, en dépit du bénéfice que ces solutions peuvent apporter de façon temporaire à l'échelle locale, elles sont considérées généralement comme trop coûteuses pour être appliquées à grande échelle (Ruggeri, 2023). Dans tous les cas, il faut améliorer les connaissances et l'information comme leur échange, renforcer la coopération régionale, consolider les compétences nationales en matière de gestion de la cryosphère et des eaux de montagne ainsi que sensibiliser les principales parties prenantes et accroître leur participation dans l'élaboration et la mise en œuvre de plans d'action (GIZ, 2021 ; UNESCO, 2022).

Le Centre régional de glaciologie pour l'Asie centrale a été créé en 2017 dans l'optique d'étudier les répercussions du changement climatique sur les glaciers, la neige et les ressources en eau, et de renforcer la coordination des activités de recherche et l'échange d'informations dans la région montagneuse de l'Asie centrale (UNESCO, s.d.). La Commission de la République du Kazakhstan et de la République kirghize sur l'utilisation des installations de gestion de l'eau ayant le statut intergouvernemental sur les cours d'eau Chu et Talas discute de la situation des glaciers dans le cadre de son Groupe de travail sur l'adaptation au changement climatique et sur les programmes d'action à long terme. Il convient également de mentionner que le Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral considère que les glaciers font partie intégrante des ressources en eau du bassin de la mer d'Aral (Comité exécutif du Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral, 2024).

7.2.4 Conclusions

Les chaînes de montagnes de cette région abritent des écosystèmes importants. Elles revêtent une importance culturelle et constituent d'importantes sources d'eau pour les zones environnantes. Cependant, elles sont menacées par les évolutions démographiques, la demande énergétique et agricole, le tourisme et le changement climatique, qui ont un impact sur les ressources hydriques des montagnes et la disponibilité de l'eau. Pour remédier à ces problèmes, des stratégies et des programmes sont en cours d'élaboration au niveau des pays. Il demeure toutefois qu'une approche plus intégrée serait plus que souhaitable, notamment afin de connecter la gestion de l'emploi des sols et la gestion des ressources en eau, et mettre en place des mesures incitatives pour protéger les écosystèmes montagneux. Les pays de montagne reconnaissent qu'un grand nombre de problèmes ne peuvent être résolus efficacement qu'en collaborant avec leurs voisins.

Les conventions des Carpates et des Alpes comme la Commission intergouvernementale sur l'Asie centrale reflètent ce besoin de coopération. De plus, les organismes de bassins transfrontaliers, telles la Commission du Dniestr, la Commission du Chou et du Talas, la Commission internationale pour la protection du Danube, la Commission internationale pour la protection du Rhin et le Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral, accordent une attention considérable aux montagnes et aux glaciers dans le cadre de la procédure générale de gestion des bassins hydrographiques comme dans des domaines de coopération thématiques spécifiques tels que l'adaptation, la conservation, la gestion des inondations et la surveillance. Les discussions menées au sein de ces organismes transfrontières, où peuvent s'échanger des connaissances et des expériences, contribuent à la création d'une dynamique d'action au niveau national.

7.3

Amérique latine et Caraïbes

Les châteaux d'eau montagneux d'Amérique latine et des Caraïbes occupent environ un tiers de la surface du territoire régional (FAO, 2000) et fournissent des quantités d'eau par unité de surface supérieures à celles de n'importe quel autre continent (Bretas et al., 2020). Les montagnes de la région comprennent la Sierra Madre au Mexique, la cordillère d'Amérique centrale, les sierras et les hauts plateaux des Caraïbes, les hauts plateaux brésiliens et les Andes (figure 7.4) (FAO, 2000). La cordillère des Andes (la plus longue chaîne de montagnes au monde, qui s'étend sur plus de 7 000 km) fournit l'essentiel des flux d'eau de la région (FAO, 2000), contribuant pour moitié au débit du fleuve Amazone (Bretas et al., 2020).

En 2017, environ 25 % de la population d'Amérique latine et des Caraïbes (soit 167 millions de personnes) vivait dans des régions montagneuses, dont 112 millions en zone urbaine. Parmi elles, quelque 17 millions vivaient dans des régions montagneuses souvent exposées à une forte variabilité du climat et à la dégradation des sols (Romeo et al., 2020).

Figure 7.4

Les principales chaînes de montagnes et rivières d'Amérique latine et des Caraïbes

Note : les parties en vert plus foncé représentent les altitudes supérieures à 1 000 mètres au-dessus du niveau de la mer.



Source : auteurs.

• • •

Les glaciers de la région subissent une réduction d'ensemble considérable en volume

Les glaciers de la région subissent une réduction d'ensemble considérable en volume (OMM, 2023). Plusieurs d'entre eux ont même complètement disparu, notamment le glacier du Ventorillo au Mexique, le glacier Chacaltaya dans l'État plurinational de Bolivie (WGMS, 2024) et le glacier de Humboldt en République bolivarienne du Venezuela (Reyes Haczek, 2022). Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le réchauffement climatique a entraîné la disparition de glaciers dans les Andes, glaciers qui ont perdu entre 30 % et 50 % de leur superficie depuis les années 1980, ce qui constitue l'une des pertes les plus importantes à l'échelle planétaire (GIEC, 2022). Tout au sud des Andes, la perte de masse glaciaire a été estimée à environ 22,9 gigatonnes par an (Dussaillant et al., 2019).

Depuis le milieu du XIX^e siècle, la Colombie a perdu 90 % de ses zones glaciaires. La disparition rapide du glacier de la Sierra Nevada de Santa Marta, l'un des rares glaciers situés près de la mer des Caraïbes (à moins de 50 km), est un exemple de cette tendance inquiétante. Ce glacier alimente plus de trente rivières, constitue un site irremplaçable de biodiversité et revêt un caractère sacré pour les quatre communautés autochtones installées dans la région, qui comptent plus de 30 000 personnes (IDEAM, 2021). La diminution du volume des glaciers affecte les flux qui permettent d'alimenter les populations en eau potable et en nourriture, ce qui oblige ces dernières à se

• • •

L'eau provenant des montagnes est essentielle à la production de cultures agricoles de forte valeur comme le café et le cacao

déplacer et à abandonner leurs lieux de vie naturels, leurs croyances et l'héritage de leurs ancêtres. La situation s'est également détériorée en raison de conflits sociaux sur l'emploi des terres lors desquels des groupes armés surgissent pour contrôler illégalement certaines propriétés et ne laissent pas d'autres choix aux communautés autochtones que de fuir (Cajar, 2024).

Le changement climatique et les activités humaines ont accéléré la déforestation dans les Andes où se trouvent des écosystèmes indispensables au captage de l'eau douce. Les forêts autochtones des hautes Andes par exemple n'occupent plus que 3 à 10 % de leur surface de départ, ce qui expose les communautés autochtones à une grave insécurité hydrique (FAO/PNU, 2023). D'autres zones montagneuses de la région sont confrontées à des dégradations du même acabit.

7.3.1 Défis et interventions pour la gestion de l'eau

L'alimentation et l'agriculture

Dans des pays tels que le Brésil, la Colombie, l'Équateur, le Guatemala, le Mexique, le Pérou et la République bolivarienne du Venezuela, l'eau provenant des montagnes est essentielle à la production de cultures agricoles de forte valeur comme le café et le cacao.

Dans la région des Andes, cette eau est également cruciale pour la culture d'aliments de base tels les pommes de terre, le maïs et le quinoa (Wyman von Dach et al., 2014). L'agriculture andine représente 3 à 13 % du produit intérieur brut et emploie 7 à 34 % de la population active (CEPALC, 2024). Les exportations de produits alimentaires représentent 18 à 54 % de l'ensemble des exportations (Olmos, 2017). Dans les pays andins, entre 15 et 17 % de l'ensemble des terres cultivées se situent dans la cordillère des Andes, la majeure partie de celles se situant en montagne étant concentrée dans le nord, à savoir en Colombie, en Équateur et au Pérou (Devenish et Gianella, 2012 ; Schoolmeester et al., 2018). L'évolution des conditions hydrologiques dans les Andes boliviennes est responsable du rétrécissement de la zone de pâturage des lamas, ce qui a obligé certains agriculteurs à se reconvertir dans la pisciculture (PNU, 2023b). La production de cultures d'hiver, d'arbres fruitiers, de vignobles et de certaines espèces forestières au Chili et dans la région centre-ouest de l'Argentine pâtit des répercussions associées à la réduction des glaciers ainsi qu'à l'augmentation des températures, à la réduction des heures de froid et à la diminution de la disponibilité de l'eau (Magrin et al., 2014).

À La Paz dans l'État plurinational de Bolivie, la communauté de Cebollullo dépend de l'eau du glacier de l'Illimani pour l'irrigation des cultures alors que le changement climatique en accélère la fonte, réduisant la disponibilité de l'eau et perturbant les récoltes. Pour remédier à cette situation, les agriculteurs ont eu recours à un ancien système d'irrigation qui utilise des sillons en zigzag pour ralentir les écoulements d'eau et réduire l'érosion des sols (BID, 2020).

Au Pérou, la laine et de la viande d'alpaga et de vigogne servent à la communauté de Phinaya à assurer sa subsistance mais la hausse des températures dans les zones d'altitude supérieure à 4 000 mètres au-dessus du niveau de la mer, à l'origine d'un assèchement des zones humides, de pénuries d'eau et de maladies, crée des difficultés pour celle-ci. À travers un projet pilote, des barrages ont été construits à l'intérieur de petites lagunes périglaciaires pour accroître la disponibilité de l'eau pour les camélidés et restaurer les zones humides comme les pâturages. Ainsi a été facilité l'élevage de ces camélidés et amélioré la quantité comme la qualité des fibres d'alpaga (Canales Sierra, 2018). Du fait de la fonte des glaciers de la cordillère

Blanche, sept des neuf bassins versants du Pérou ont franchi un seuil critique qui a dépassé les possibilités d'adaptation¹⁷, en raison de la réduction des eaux de surface et du débit des rivières pendant la saison sèche (Samaniego et al., 2017).

Au Guatemala, dans le couloir de la sécheresse qui traverse la partie centrale de la cordillère, les agriculteurs sont confrontés aux variabilités climatiques, à des périodes de sécheresse et à des phénomènes météorologiques extrêmes de plus en plus fréquents, qui perturbent les calendriers de plantation habituels. La mise en œuvre d'un programme dans les départements de Chiquimula, El Progreso et Zacapa a pour objectif de pallier ces difficultés et de venir en aide à 6 000 familles d'agriculteurs au sein de soixante communautés. Ces régions s'avèrent particulièrement touchées par les conditions climatiques défavorables, les problèmes socio-économiques et un manque d'accès aux ressources. L'Approche services climatiques participatifs et intégrés pour l'agriculture (PICSa) renforce l'accès à des informations climatiques fiables, permettant aux communautés de prendre des décisions renseignées en matière d'agriculture. Par ailleurs, des ateliers de formation ont permis à plus de cinq milles dirigeants communautaires de mettre ces savoirs en application (Valdivia Araica et al., 2023).

Les établissements humains

Les villes qui ont besoin de l'eau de fonte des glaciers pour leur approvisionnement en eau domestique ont connu des réductions concrètes de la disponibilité de ces eaux (GIEC, 2022). Entre 1970 et 2010 notamment, la superficie des glaciers qui alimentent Lima en eau a diminué de 43 % en raison de la hausse des températures ayant provoqué la fonte des glaces. De fait, en 2010, la disponibilité potentielle de l'eau pour la ville s'est trouvée réduite à 125 m³ par habitant et par an, soit l'une des plus faibles de la région¹⁸ (González Molina et Vacher, 2014). Si les températures continuent d'augmenter, on peut envisager une accélération de la fonte ainsi qu'une augmentation des ruissellements dans les sous-bassins (voir encadré 2.2). Par la suite, lorsque la taille du réservoir du glacier aura diminué, les apports en eaux de fonte seront moindres (González Molina et Vacher, 2014).

De la même façon, la ville de Santiago, qui a partiellement besoin de l'eau provenant de la fonte des glaces, court un risque significatif du fait d'une méga-sécheresse. Avec un déficit pluviométrique de 20 à 40 %, on assiste à une réduction notable des accumulations de neige ainsi qu'à une baisse des niveaux des réservoirs et des nappes phréatiques (Garreaud et al., 2019). Ceci met en péril l'approvisionnement en eau de la ville, en particulier pendant l'été, car on estime que jusqu'à 70 % de son eau provient des glaciers (Aguas Andinas, 2024).

À Bogota, environ 80 % de l'eau potable de la ville provient du páramo de Chingaza tandis que 5 % et 15 % proviennent respectivement du páramo de Sumapaz et du complexe de páramos de Guerrero (Canal Capital, 2023). Il convient de mentionner que les niveaux d'eau du système de Chingaza ont connu une réduction importante, avec une chute de 85 % provoquée par le phénomène El Niño, une saison sèche prolongée et des températures élevées, ce qui a causé un rationnement de l'eau dans cette ville de 8 millions d'habitants en avril 2024 (Ownby, 2024).

¹⁷ Il s'agit de seuils où les objectifs d'un individu ou d'un système ne peuvent plus être remplis, même avec des mesures d'adaptation car la capacité d'adaptation des organismes et des communautés a été dépassée (Klein et al., 2014). Les adaptations transformatives, tels le déplacement de la production dans des zones plus fraîches ou la diversification en d'autres cultures, offrent des options et des stratégies pouvant être utilisées pour réorganiser les systèmes lorsqu'ils atteignent leurs limites de fonctionnement (Samaniego et al., 2017).

¹⁸ En 2021, les réserves en eau renouvelables annuelles totales par habitant dans les pays andins étaient de 41 090 m³ en moyenne (FAO, s.d.).

• • •

La plupart des pays des Andes tropicales doivent avoir recours aux eaux de fonte des glaces et des neiges pour produire l'électricité dont ils ont besoin

En vue de faire face à des problèmes similaires, les habitants des hautes terres centrales de l'Équateur ont participé à un programme de rémunération des services écosystémiques et reçu des subventions financières directes (30 dollars EU par hectare et par an) du Gouvernement central dans le cadre du programme Socio Páramo, (Torres et al., 2023). Ces collectivités, dirigées par des jeunes, ont adopté des stratégies basées sur les réseaux sociaux, qui encouragent la participation et le partage des savoirs locaux en vue de protéger et de restaurer le páramo. Il s'agissait notamment de désigner des zones protégées pour la recharge en eau, de réduire le pâturage et de restaurer la végétation autochtone, en s'appuyant sur des aides financières et en saisissant de nouvelles opportunités de développement. Ainsi, le taux de disparition du páramo a été réduit à 3,3 % entre la deuxième (2000-2008) et la troisième période (2013-2021) du projet, comme le confirment les images satellites. En dépit des efforts concrets déployés par le Gouvernement, l'efficacité de la protection des páramos s'est avérée plus grande dans les zones où les décisions ont été prises localement, ce qui souligne l'importance de la participation des habitants dans la gestion durable des ressources en eau et la résilience au changement climatique (Torres et al., 2023).

À Intag en Équateur, un projet de protection des ressources en eau et des forêts a porté ses fruits pour trente-huit communautés locales, soit environ 7 000 personnes. Il a permis la création de réserves pour les bassins hydrographiques, réserves qui ont été acquises par une organisation non gouvernementale locale et sont gérées de façon communautaire de manière durable. La qualité de l'eau, la prévention des inondations et des glissements de terrain de même que la promotion de l'écotourisme en ont été améliorées et l'émigration réduite. En impliquant les communautés dans la gestion de ces réserves, ce projet a donné l'opportunité à celles-ci de prendre davantage conscience des efforts de conservation nécessaires tout en favorisant la prise d'autonomie des acteurs locaux (PNUD, 2019 ; FAO/PNUD, 2023).

L'industrie et l'énergie

Outre d'être une source vitale d'eau, les montagnes sont source d'énergie durable pour les villes et les petites communautés de basse altitude ainsi que pour les villages isolés des zones élevées. En 2013, 85 % de l'énergie hydroélectrique produite en Amérique latine provenait de sources situées en altitude (Partenariat de la montagne, 2013).

La plupart des pays des Andes tropicales doivent avoir recours aux eaux de fonte des glaces et des neiges pour produire l'électricité dont ils ont besoin. En Équateur par exemple, environ 92 % de la production d'énergie provient de centrales hydroélectriques (Ministère équatorien de l'énergie et des mines, s.d.). Une estimation concernant Canon del Pato, l'une des plus grandes usines hydroélectriques du Pérou, prévoit une réduction de 15 % de sa production électrique en cas de disparition complète des glaciers (UNESCO/UICN, 2022).

La production d'énergie hydroélectrique est aussi affectée par la baisse des niveaux de précipitations. Dans la plupart des scénarios envisagés, l'Argentine et le Chili seront confrontés à des réductions notables de leur production hydroélectrique entre 2020 et 2100 (AIE, 2021). Ces réductions s'expliquent principalement par la baisse des précipitations moyennes (en raison du changement climatique) dans les Andes centrales et en Patagonie ainsi que par la diminution subséquente des débits alimentant les principaux bassins versants.

Dans les pays andins, les zones de haute altitude ont été le théâtre de conflits sociaux liés à l'eau, dont beaucoup sont en partie attribuables aux activités minières. Outre d'accroître les prélevements d'eau, l'exploitation minière modifie, dans une certaine mesure, les bassins hydrographiques, à la fois en surface (par l'élimination de terre ou du couvert végétal, par l'altération ou l'endiguement des rivières, par la suppression des glaciers et la modification de la topographie notamment) et en profondeur, ce qui peut avoir une incidence négative sur la disponibilité de l'eau pour les usagers en aval (Altomonte et Sánchez, 2016). Au Chili, le long de la chaîne de montagnes reliant Copiapó à Rancagua, les projets miniers ont perturbé 4,5 km²

de glaciers rocheux en 2010, causant une perte d'eau douce estimée à environ 24 106 m³ (Bodin, 2019). En comparaison, le glacier du Nevado Juncal (7,6 km²), situé près de Santiago, a perdu 1,5 km² de sa superficie entre 1955 et 2006 (Bown et al., 2008).

La protection environnementale

L'Argentine dispose d'une loi spécifique et ratifiée, consacrée à la protection des glaciers. Promulguée en octobre 2010 sous le nom de Loi 26.639 et intitulée *Régime budgétaire minimum pour la préservation des glaciers et de l'environnement périglaciaire*, elle a pour principal objectif la sauvegarde des glaciers en tant que réserves d'eau stratégiques et de zones primordiales de biodiversité, ainsi que la reconnaissance de leur valeur en tant que référentiels scientifiques et attractions touristiques. Cette loi fixe des interdictions strictes, notamment en ce qui concerne le rejet de polluants toxiques, les activités de construction, l'exploitation minière, la prospection d'hydrocarbures et les installations industrielles (Gouvernement argentin, 2010). Le Chili, quant à lui, met en place des initiatives destinées à la promulgation d'une loi sur la protection des glaciers. Un projet de loi, approuvé par la Commission sénatoriale de l'environnement et comportant des dispositions explicites sur la protection du pergélisol, a été présenté en 2022 (Commission de l'environnement et des biens nationaux, 2022).

Certains glaciers et certaines zones montagneuses enneigées bénéficient d'une protection indirecte du fait de leur inclusion dans des espaces particuliers, tels les parcs nationaux ou autres zones protégées. Sur le territoire colombien par exemple, six glaciers sont protégés depuis 1959, bénéficiant du statut de parcs naturels nationaux, conformément aux mandats définis par la Constitution politique de 1991, en vertu de laquelle ils ont été désignés comme des biens d'utilité publique, caractérisés par leur caractère inaliénable, imprescriptible et insaisissable — ce qui signifie qu'ils ne peuvent être transférés, soumis à expiration, saisis ou confisqués (García Pachón, 2018). De la même façon, en Équateur, les zones de haute altitude avec des chutes de neige perpétuelles font partie de plusieurs zones protégées. Une partie importante du territoire chilien fait partie du Système national des zones sauvages protégées de l'État (SNASPE) qui compte de nombreux glaciers parmi les zones désignées (Ministère chilien des biens nationaux, 2023).

Confrontés aux bouleversements des masses d'eau des montagnes, de nombreux pays de la région mènent des projets de recherche et de surveillance dans l'optique de répondre à ce problème urgent (voir chapitre 8). Depuis octobre 2023, l'État plurinational de Bolivie effectue notamment une surveillance active des glaciers dans les bassins des villes d'El Alto et de La Paz (Ministère bolivien des affaires étrangères, 2023). Le Chili, quant à lui, dispose d'un réseau de stations glaciologiques comprenant au moins 80 points de surveillance qui facilitent une évaluation complète de la dynamique des glaciers (Ministère chilien des travaux publics, 2023).

7.3.2 Conclusions

Les régions montagneuses d'Amérique latine et des Caraïbes sont de plus en plus perturbées par le changement climatique et les activités anthropiques. Ces perturbations altèrent le cycle hydrologique, ce qui menace les communautés qui dépendent de l'agriculture pour leur subsistance. De plus, elles ont des conséquences considérables dans les zones de basse altitude et les centres urbains, qui dépendent des sources d'eau de montagne pour leur approvisionnement en eau potable et en énergie.

En réaction, plusieurs pays ont instauré des politiques et adopté des lois visant à protéger ces écosystèmes essentiels. Cependant, la détérioration de certains d'entre eux a déjà dépassé les seuils critiques, de sorte qu'il est crucial de promouvoir des mesures d'adaptation telles que a) la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature, notamment le reboisement, b) l'adoption de pratiques traditionnelles telles que les techniques de

collecte de l'eau et d'ensemencement largement employées par les communautés autochtones de la région, c) la poursuite de stratégies d'adaptation transformatrices, destinées à répondre à la demande en eau pour les cultures et à garantir des moyens de subsistance, d) l'agrandissement des infrastructures de collecte d'eau.

La mise en œuvre efficace de ces mesures requiert un financement bien ciblé, un suivi rigoureux, un renforcement des capacités ainsi que des cadres de gouvernance inclusifs, qui favorisent le dialogue et l'inclusion des communautés locales, en vue d'appliquer les meilleures méthodes disponibles en fonction des contextes locaux des régions montagneuses.

7.4

Asie et Pacifique

Plusieurs des plus hauts sommets et des systèmes de glaciers les plus étendus au monde se trouvent dans la région Asie-Pacifique. Le plateau tibétain et les chaînes de montagnes environnantes de la région himalayenne de l'Hindou Kouch-Pamir ainsi que les monts Hengduan, les montagnes Tian Shan et les monts Qilian forment une zone de haute montagne de 5 millions de kilomètres carrés, dont cent milles kilomètres carrés comportent des glaciers. Ce que l'on nomme le « troisième pôle » — qualifié aussi de château d'eau de l'Asie — regorge de plus de glace et de neige que toute autre région du monde hors Antarctique et Arctique (PNUE, 2022b). Y trouvent leur source plus de dix réseaux fluviaux indispensables à la survie de près de deux milliards de personnes réparties dans les bassins fluviaux de l'Asie centrale, de l'Asie du Nord-Est, de l'Asie du Sud et de l'Asie du Sud-Est (ICIMOD, 2023). Il est prévu que son réchauffement soit plus rapide que la moyenne mondiale (PNUE, 2022b). Abritant une grande variété de cultures, ce troisième pôle est également l'une des régions les plus diversifiées sur le plan biologique mais aussi l'une des plus fragiles sur le plan écologique.

7.4.1 Tendances et impacts

Les montagnes et les glaciers de la région Asie-Pacifique sont parmi les plus vulnérables aux changements climatiques, sociaux et environnementaux en cours (Immerzeel et al., 2020). Les glaciers de la région himalayenne de l'Hindou Kouch-Pamir disparaissent à un rythme alarmant : au cours de la période 2011-2020, leur rythme de disparition s'est accéléré de 65 % par rapport à la décennie précédente (ICIMOD, 2023). Ils fondent également plus rapidement que la moyenne mondiale (Mani, 2021), les pertes les plus importantes se produisant dans l'est de la région himalayenne de l'Hindou Kouch (figure 7.5).

Selon plusieurs scénarios de réchauffement des températures mondiales entre 1,5 °C et 2 °C, le volume des glaciers de la région himalayenne de l'Hindou Kouch pourrait diminuer de 30 % à 50 % d'ici à 2100. Si le réchauffement climatique venait à dépasser les 2 °C, ces glaciers pourraient perdre 20 % à 45 % de leur volume par rapport à 2020 (ICIMOD, 2023).

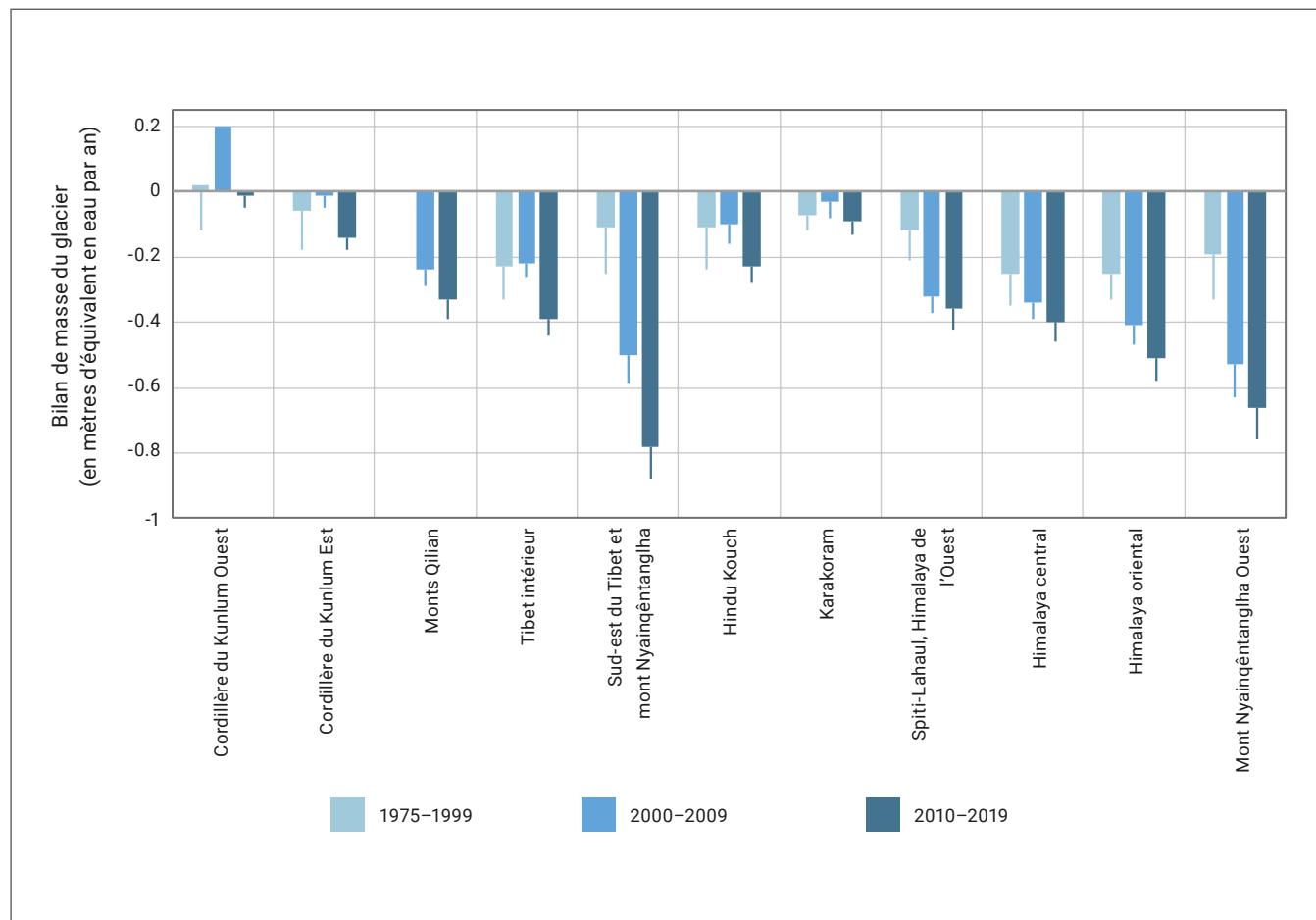
Ces tendances au réchauffement et à la fonte seront à l'origine de bouleversements importants. Il est prévu une augmentation des ruissellements totaux dans la région du troisième pôle, avec des répercussions plus importantes sur les bassins fluviaux dominés par la mousson. Les fleuves tels que l'Indus, pour lesquels la contribution de la fonte des glaciers et de la neige est élevée, l'augmentation du débit devrait atteindre son maximum (voir encadré 2.2) avant de diminuer (Wester et al., 2019 ; PNUE 2022b).

Si les impacts varient en fonction des bassins hydrographiques, les différents travaux de recherche insistent sur le fait que la fonte des glaciers est une cause des vidanges brutales de lacs glaciaires (voir section 2.2.3), des crues soudaines et des glissements de terrain (Adler et al., 2022) ainsi qu'un facteur aggravant des dommages causés

• • •

Plusieurs des plus hauts sommets et des systèmes de glaciers les plus étendus au monde se trouvent dans la région Asie-Pacifique

Figure 7.5 Répartition de la masse des glaciers à l'échelle régionale, exprimée en mètres d'équivalent en eau (m.e.a.) par an, entre différentes zones de la région himalayenne de l'Hindou Kouch au cours des périodes 1975-1999, 2000-2009 et 2010-2019



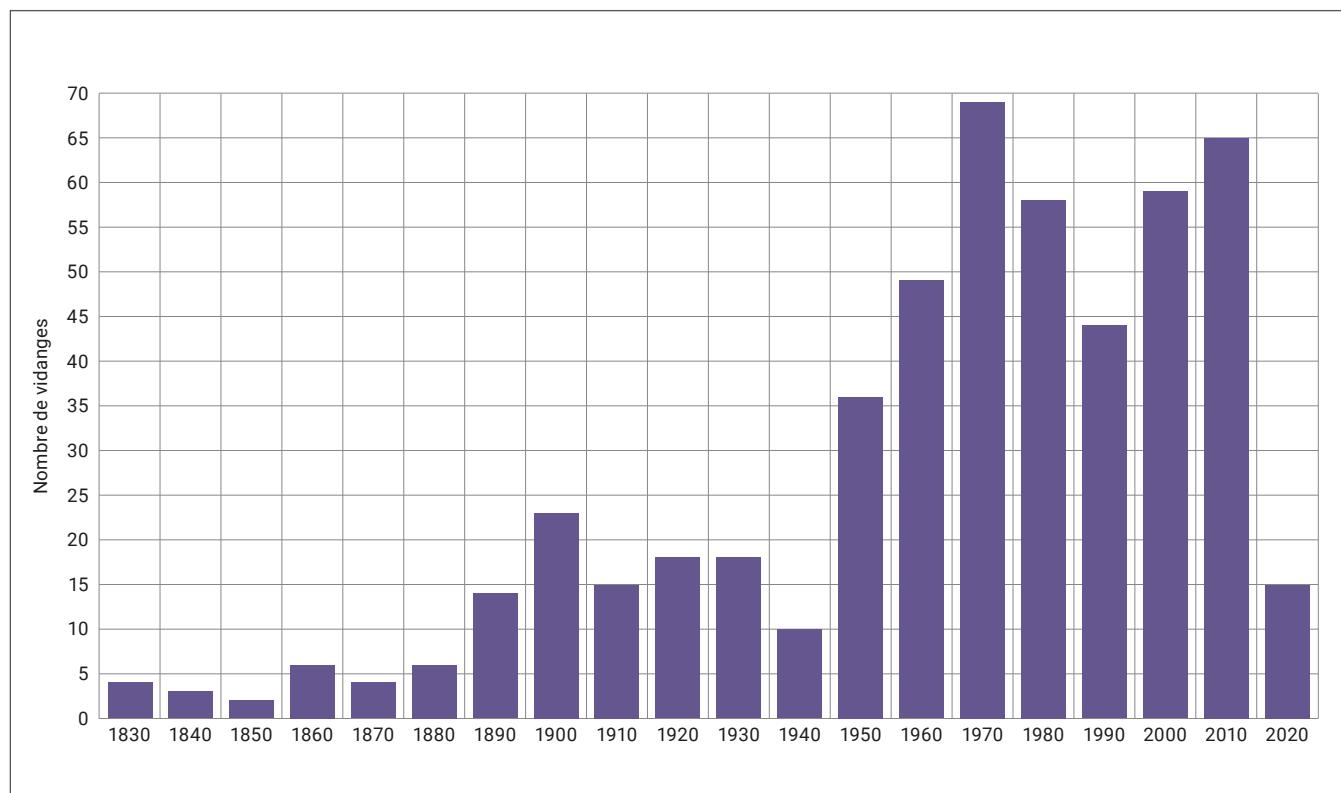
Note : Une valeur de $-1,0$ m.e.a. par an représente une perte de masse de $1\,000\text{ kg/m}^2$ de couche de glace ou une perte annuelle d'épaisseur de glace à l'échelle du glacier d'environ $1,1\text{ m}$ par an, la densité de la glace n'étant que $0,9$ fois supérieure à celle de l'eau.

Source : CESAP/PNUD/OIT/Centre régional de collaboration Asie-Pacifique de la CNUCC/ONUDI (2023, fig. 20, p. 74), sur la base de données de Jackson et al. (2023).

aux établissements humains, à la production agricole et aux pâturages, aux réseaux de transport et aux systèmes d'énergie hydroélectrique. Au cours des cent quatre-vingt-dix dernières années, on estime que plus de 7 000 décès (Shrestha, 2023) ont été causés par des vidanges brutales de lacs glaciaires qui sont de plus en plus fréquentes et résultent de la formation et de l'expansion rapides de ces lacs (figure 7.6). Selon les prévisions, le risque de survenue de ces phénomènes dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch devrait tripler d'ici à la fin du siècle, d'autres pays en aval, principalement dans l'est de l'Himalaya, étant aussi touchés (Zheng et al., 2021). Nombre de leurs conséquences ne pourront être compensées par des mesures d'adaptation.

À long terme, la réduction des débits d'eau et l'augmentation des sécheresses devraient compromettre la sécurité alimentaire, hydrique, énergétique comme les moyens de subsistance dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch (Mani, 2021), perturber les écosystèmes et exacerber les risques de conflit et de migration (Caretta et al., 2022). Les populations les plus vulnérables et marginalisées, notamment les agriculteurs de montagne et les communautés autochtones, sont souvent les plus exposées.

Figure 7.6 Nombre de vidanges brutales de lacs glaciaires enregistrées par décennie dans les régions de haute montagne d'Asie, décennies de 1830 à 2020



Source : adapté de Shrestha (2023).

• • •

Les dépôts de carbone noir augmentent la fonte des glaciers

L'emploi d'énergie, la dégradation de l'environnement et l'activité anthropique d'autres problèmes tels que la présence accrue de carbone noir (voir encadré 2.1), de métaux lourds et de polluants organiques persistants au sein de ce troisième pôle (PNUE, 2022b). Les dépôts de carbone noir (provenant de la combustion incomplète de combustibles fossiles et de la combustion de la biomasse, notamment par les feux de forêt) augmentent la fonte des glaciers à différents degrés selon les lieux, qu'ils tombent sur la neige fraîche ou la glace, ainsi que d'autres facteurs (Kang et al., 2020). Une étude a établi que la perte de masse glaciaire sur le plateau tibétain en l'espace de 40 ans était d'environ 450 km³, dont 20 à 80 km³ étaient attribués aux effets du carbone noir et d'autres dépôts responsables de l'absorption de la lumière (Zhang et al., 2018). Du fait de la dessiccation de la mer d'Aral et de ses environs, l'Aralkum est désormais considéré comme l'une des sources de poussière les plus nocives au monde. Ce désert, qui a été généré par l'activité humaine, constitue une source de polluants, tels les métaux lourds et les pesticides qui se déplacent sur de longues distances, accélérant la fonte des glaciers et contaminant les systèmes d'eau douce (Zhang et al., 2020 ; Banks et al., 2022 ; Chen et al., 2022).

Outre dans la région du troisième pôle, la fonte des glaciers et les menaces qui pèsent sur les écosystèmes montagneux sont une préoccupation majeure dans le Pacifique. Le recul des glaciers a également été observé dans les Alpes du Sud en Nouvelle-Zélande. D'ici à 2100, le pays devrait perdre 88 % de ses glaciers en volume par rapport à 2011. L'apparition d'espèces allogènes, le changement climatique et les activités humaines posent d'importants défis aux écosystèmes montagneux des petits États insulaires en développement du Pacifique et entraînent des changements au niveau des réserves d'eau, des risques d'incendie et des menaces pour la biodiversité (Frazier et Brewington, 2020).

Les tendances et les effets susmentionnés montrent l'importance d'une collaboration sur les stratégies et les mesures d'adaptation destinées à atténuer les conséquences du changement climatique, en particulier pour les régions vulnérables.

7.4.2 Coopération régionale et transfrontière

La coopération régionale en matière de surveillance des glaciers a joué un rôle essentiel pour repérer les grandes évolutions de ceux-ci. Plusieurs décisions importantes, décrites ci-dessous, ont été prises en vue de renforcer les dispositions institutionnelles en faveur d'une coopération sur les bassins hydrographiques partagés, en particulier au niveau de la coopération scientifique et des dispositifs d'alerte précoce. Ce sont là des modèles pour les régions montagneuses qui disposent de bassins hydrographiques transfrontaliers et qui cherchent à se prémunir contre les répercussions du changement climatique et de la fonte des glaciers, au sein et en dehors de la région Asie-Pacifique.

La coopération scientifique internationale sur le troisième pôle en vue de renforcer les dispositifs d'alerte précoce et les analyses d'impact

La mise en place du Réseau de centres climatiques régionaux du troisième pôle de l'Organisation météorologique mondiale (Réseau TPRCC) constitue une avancée essentielle pour répondre aux exigences de service spécifiques à la région du troisième pôle en termes de climat et de cryosphère. Les trois antennes de ce réseau comprennent une antenne nord (dirigée par la Chine), une antenne sud (dirigée par l'Inde) et une antenne ouest (dirigée par le Pakistan) tandis que la Chine occupe le rôle de coordinatrice générale (OMM, 2024b). La Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique, associée au Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes, au programme Third Pole Environment, à la Veille mondiale de la cryosphère relevant de l'OMM, le programme Global Energy and Water Exchanges et l'Initiative pour la recherche sur la montagne (MRI), sont autant de partenaires qui apportent leur contribution au Réseau de centres climatiques régionaux du troisième pôle, dont la phase de test a eu lieu en juin 2024 à Lijiang, en Chine. Le réseau soutient l'adoption de dispositifs d'alerte précoce et d'analyses d'impact. Il publie aussi des déclarations de consensus périodiques qui incluent des données d'observation, des évolutions historiques et des prévisions qui donnent un bilan des températures atmosphériques, des précipitations, de la couverture neigeuse, des événements extrêmes et des catastrophes naturelles observés au cours de la saison précédente ainsi que les perspectives pour la saison à venir.

Un réseau d'observatoires de montagne en Asie centrale pour la recherche commune et l'alerte précoce

Le Centre régional de glaciologie pour l'Asie centrale est un centre de catégorie 2, créé sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture au Kazakhstan après la ratification d'un accord avec le pays en 2017. Il fournit une plateforme à la coopération scientifique et technique transfrontière pour la surveillance des glaciers en Asie centrale (UNESCO, 2024 ; s.d.). En 2023, il a signé un mémorandum d'accord avec les représentants des institutions nationales et d'autres institutions de surveillance hydrométéorologique d'Asie centrale en vue de la mise en place d'une coopération multilatérale et d'un cadre de travail destinés à faire progresser la recherche glaciologique au sein du réseau d'observatoires de montagne d'Asie centrale. Ce réseau a été créé pour fournir des jeux de données préliminaires en accès libre à partir d'activités de surveillance antérieures et renforce les capacités de surveillance connexes dans la région (Initiative pour la recherche sur la montagne/GEO Mountains, 2023). Jusqu'à présent, les activités de collaboration ont pris la forme d'études conjointes, d'expéditions sur le terrain et de l'installation d'un dispositif d'alerte précoce pour les débordements de lacs de moraines.

• • •

Un travail de collaboration visant à mobiliser les différents acteurs et secteurs concernés par ces évolutions est essentiel

Coopération transfrontière dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch

Le Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes a lancé l'Appel à l'action pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch, approuvé une déclaration ministérielle en 2020. Cet appel, qui a mobilisé de nombreuses parties prenantes par le biais d'ateliers consultatifs au moment de sa rédaction, exhorte à une coopération à tous les niveaux dans la région, à la reconnaissance du caractère unique des populations montagnardes de l'Hindou Kouch, à une action climatique concertée, à l'accélération des actions autour de neuf priorités relatives aux montagnes, à l'amélioration de la résilience des écosystèmes et à l'arrêt des pertes de biodiversité, au partage des données régionales et à la coopération en matière de science et de savoirs (ICIMOD, 2020). L'Appel à l'action a permis de renforcer les partenariats établis entre les pays de la région himalayenne de l'Hindou Kouch en vue du développement durable des montagnes et de défendre la cause des montagnes lors des forums mondiaux (ICIMOD, s.d.). Il a bénéficié d'un nouvel élan grâce au deuxième Sommet ministériel de la montagne de la région himalayenne de l'Hindou Kouch, qui s'est tenu en 2024.

L'accès à des données et à des prévisions en temps quasi réel dans le bassin du Mékong

Le bassin du Mékong est vulnérable aux effets du changement climatique et à ceux de la fonte des glaciers. Depuis 2008, 49 stations hydrométéorologiques automatiques, mises en place au Cambodge, dans le sud de la Chine, en République démocratique populaire lao, en Thaïlande et au Viet Nam sous l'égide du projet Mekong Hydrological Cycle Observing System (Hycos), collectent des données, notamment sur les niveaux de l'eau et les précipitations. Ces stations transmettent des données en temps quasi réel, soit toutes les 15 minutes, au secrétariat de la Commission du Mékong et aux agences nationales chargées de la réduction des risques de catastrophes naturelles et de la gestion des ressources en eau. L'état quotidien des niveaux d'eau, les prévisions hebdomadaires, les moyennes à long terme, les alertes aux crues soudaines et les prévisions de sécheresse constituent autant de données et d'informations facilement accessibles sur le site web du secrétariat de la Commission du Mékong (Commission du Mékong, s.d.).

7.4.3 Les voies à suivre

Un travail de collaboration visant à mobiliser les différents acteurs et secteurs concernés par ces évolutions est essentiel. La fonte des glaciers et les crises liées aux ressources en eau nécessitent l'application de mesures d'adaptation renforcées, d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et de solutions synergiques pour le climat, la nature et la pollution, soutenues par une collaboration transfrontière, un dialogue régional ainsi que des actions de plaidoyer et de sensibilisation.

Réagir aux pressions que le climat, les pollutions atmosphériques et organiques font peser sur les glaciers

La mise en œuvre de mesures viables sur le plan économique et technique, comme d'améliorer l'efficacité des fours à briques et inciter les foyers à user de combustibles plus propres, tels le gaz de pétrole liquéfié et l'énergie solaire, peut contribuer de beaucoup à l'atténuation de la fonte des glaciers par l'intermédiaire de la réduction des émissions de carbone noir (Mani, 2021). Les mesures destinées à atténuer l'assèchement dans le bassin de la mer d'Aral et à réduire les tempêtes de poussière revêtent une importance particulière, notamment les solutions fondées sur la nature, lesquelles devraient être davantage considérées dans le contexte d'une planification pour l'adaptation au changement climatique. La lutte contre les émissions de poussière et de carbone noir peut contribuer à réduire les pressions exercées sur les glaciers en permettant de converser leurs propriétés d'albédo et d'améliorer les conditions environnementales.

Planifier l'adaptation de concert

Si les crises liées à l'eau constituent probablement le cœur de l'adaptation au changement climatique au sein des zones de haute montagne en Asie et dans le Pacifique, il est essentiel de mettre en place des stratégies d'adaptation conjointes, élaborées au-delà des frontières nationales et administratives. Des investissements dans des infrastructures résilientes, des solutions fondées sur la nature, des dispositifs d'alerte précoce efficaces et fonctionnels, des analyses d'impact et de risques renforcées et publiques, y compris au niveau sectoriel, sont indispensables pour identifier les risques graves, les domaines nécessitant des recherches plus approfondies et les opportunités de sensibilisation et d'engagement avec les secteurs concernés. En parallèle, il convient d'installer des réseaux de surveillance environnementale qui permettent de suivre l'évolution de la quantité et de la qualité des ressources en eau.

Alors que les initiatives institutionnelles fleurissent, un cadre d'action peut aider à assurer la coordination entre les partenaires du développement, à concrétiser des projets et des investissements pour faire face aux menaces locales et transfrontières. La planification de l'adaptation à long terme, notamment à travers la méthode des « voies d'adaptation » ou des approches telles l'adaptation écosystémique et la diversification des moyens de subsistance et de financement, jouent également un rôle essentiel.

La double stratégie de gestion des risques et de renforcement de la résilience et de l'autonomie des communautés

La gestion des risques de catastrophe naturelle liés aux glaciers, telles les vidanges brutales de lacs glaciaires, requiert une double approche intégrée.

Première approche : renforcement des dispositifs d'alerte précoce. Pour déclencher une action précoce ou anticipée, il convient de disposer de dispositifs d'alerte précoce centrés sur les personnes, basés sur les impacts et fondés sur l'évaluation des risques. Ils doivent prendre en compte des risques complexes et en cascade, telles les averses torrentielles liées aux glissements de terrain, et être adaptés aux besoins des secteurs essentiels, tels l'énergie, l'eau, les transports, les moyens d'information et de communication, grâce à l'évaluation des risques et à la prévision des incidences.

Seconde approche : renforcement de la résilience des infrastructures. Il convient de développer des infrastructures résilientes, capables de résister et de s'adapter aux aléas, ainsi que des infrastructures qui contribuent à la résilience sociale et économique à plus grande échelle. Cette approche revêt une grande importance dans les zones à risques multiples et doit reposer sur une cartographie complète des risques ainsi qu'une évaluation intégrée. Les secteurs d'infrastructures critiques doivent être conçus dans l'optique de gérer les risques interconnectés, de garantir une résilience systémique contre les urgences et les perturbations locales.

Plusieurs initiatives de coopération mettent l'accent sur l'autonomisation et la participation des communautés locales, y compris des populations autochtones, des jeunes et des groupes vulnérables, dans les dispositifs d'alerte précoce et les processus d'adaptation à plus grande échelle. La région Asie-Pacifique pourrait tirer profit d'une extension de certaines initiatives de dispositifs communautaires d'alerte précoce aux inondations et d'innovations similaires en vue de renforcer la coopération transfrontière dans les bassins hydrographiques partagés (encadré 7.3).

Encadré 7.3 Un dispositif collectif et transfrontières d'alerte précoce aux inondations

En 2017, des dispositifs d'alerte précoce télémétriques ont été mis en place dans les districts de Sitamarhi en Inde et de Mahottari au Népal – avec la participation des collectivités locales, des organisations partenaires et des agences gouvernementales ainsi que le soutien du Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes – et ont fourni à temps des informations relatives aux inondations à plus de 19 000 foyers (près de 100 000 personnes) (ICIMOD, 2017). Les canaux d'information officiels mettent généralement du temps à diffuser les alertes dans les zones reculées, qui sont souvent aussi les plus vulnérables. Toutefois, les dispositifs communautaires transfrontières d'alerte précoce aux inondations s'appuient sur des méthodes plus directes, telles les communications par téléphone portable, et garantissent une transmission d'informations plus rapide.

Un dispositif communautaire transfrontière d'alerte précoce aux inondations a été mis en place pour les habitants installés le long des rives de la rivière Ratu – une rivière transfrontalière entre l'Inde et le Népal. Lors d'une inondation survenue le 12 août 2017, ce dispositif a permis d'améliorer la préparation contre les inondations dans le village de Shrikhandi dans le district de Sitamarhi (Bihar). L'instrument d'alerte précoce installé par le Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes et Yukanter, une ONG locale, a donné sept à huit heures d'avance aux communautés locales qui ont pu prendre des mesures concrètes, notamment en se déplaçant vers des endroits plus sûrs.

Sources : ICIMOD (2017) ; Singh Shrestha et Sherchan (2018).

Les dispositifs opérationnels pour les cours d'eau transfrontaliers et la gestion intégrée des ressources en eau

Les graves répercussions de la fonte des glaciers sur la gestion des ressources en eau dans les zones situées en aval et le partage des cours d'eau transfrontaliers dans la région Asie-Pacifique exigent une attention accrue. En dépit des progrès significatifs réalisés dans la surveillance régionale, le partage des données et les systèmes de prévision, force est de constater que les mesures de base destinées à la mise en place d'une gestion intégrée des ressources en eau dans les bassins hydrographiques, qu'ils soient transfrontaliers ou nationaux, sont à la traîne par rapport à d'autres régions du monde.

En 2023, seuls deux pays asiatiques partageant des eaux transfrontalières, à savoir le Cambodge et la Mongolie, avaient conclu des accords opérationnels pour au moins 90 % de leurs eaux, accords dont l'importance s'accroît pour pouvoir gérer l'impact des changements actuels dans les régimes hydrologiques ; en Europe et en Amérique du Nord, ce nombre s'élève à vingt-trois (ONU, s.d.). Exiger une gestion efficace des ressources en eau est une étape de base et requiert encore davantage d'investissements et d'attention dans la région Asie-Pacifique, en particulier dans les zones où la disponibilité et la qualité des eaux souffrent du changement climatique et des problèmes accusés de pollution environnementale.

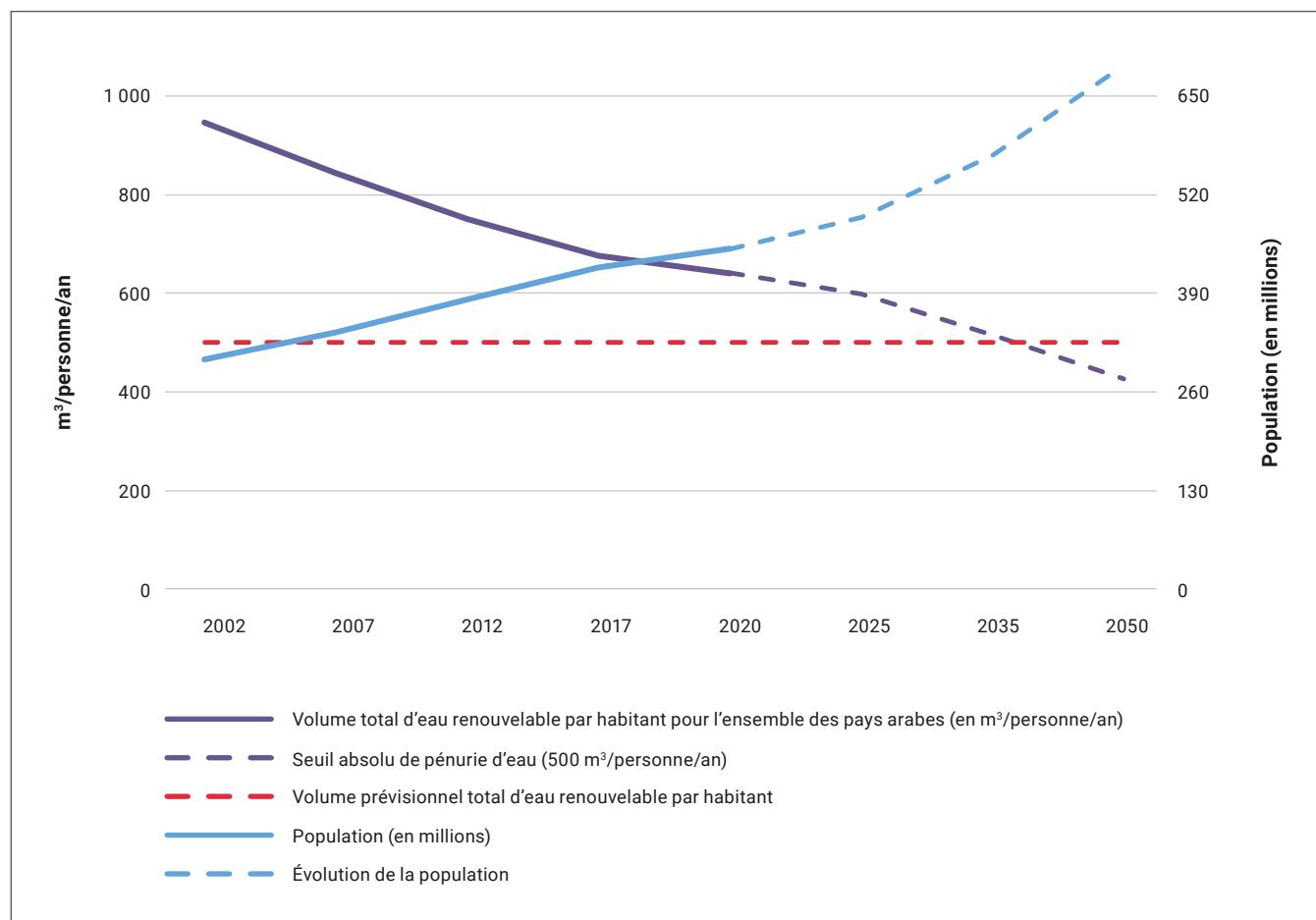
7.4.4 Conclusions

Les activités humaines et le changement climatique font peser une grave menace sur les montagnes et les glaciers de la région Asie-Pacifique. Ils contribuent à l'aggravation des défis hydrologiques complexes auxquels la région est confrontée. Il est vital de trouver des solutions intégrées pour renforcer la capacité d'adaptation et la résilience de la région tout en réduisant les pressions qui s'exercent sur les glaciers et les écosystèmes aquatiques. Les mesures transfrontières d'adaptation, fondées sur les principes de coopération et de responsabilisation des parties prenantes, ont prouvé les avantages d'une collaboration à l'échelle régionale. En s'appuyant sur ces progrès, il faut renforcer les approches transfrontières qui harmonisent les politiques au sein du secteur de l'eau avec des objectifs climatiques et socio-environnementaux plus vastes au sein de la région.

7.5 Région arabe

Les montagnes de la région arabe sont souvent négligées en dépit de leur rôle majeur dans l'apport de ressources en eau et d'autres services écosystémiques. C'est là que sont aussi installés des communautés prospères et des centres d'activité économique axés sur le tourisme, l'agriculture et l'industrie, qui dépendent souvent de la disponibilité de plus en plus réduite des ressources en eau douce, ce qui se traduit par une diminution de la quantité d'eau renouvelable disponible par habitant. Compte tenu de la prévision de croissance démographique, l'ensemble de la région arabe sera passée sous le seuil de pénurie absolue d'eau d'ici à 2050 (figure 7.7).

Figure 7.7 Diminutions passée et future de la quantité d'eau renouvelable par habitant en fonction de la croissance démographique estimée dans la région arabe, 2002-2050

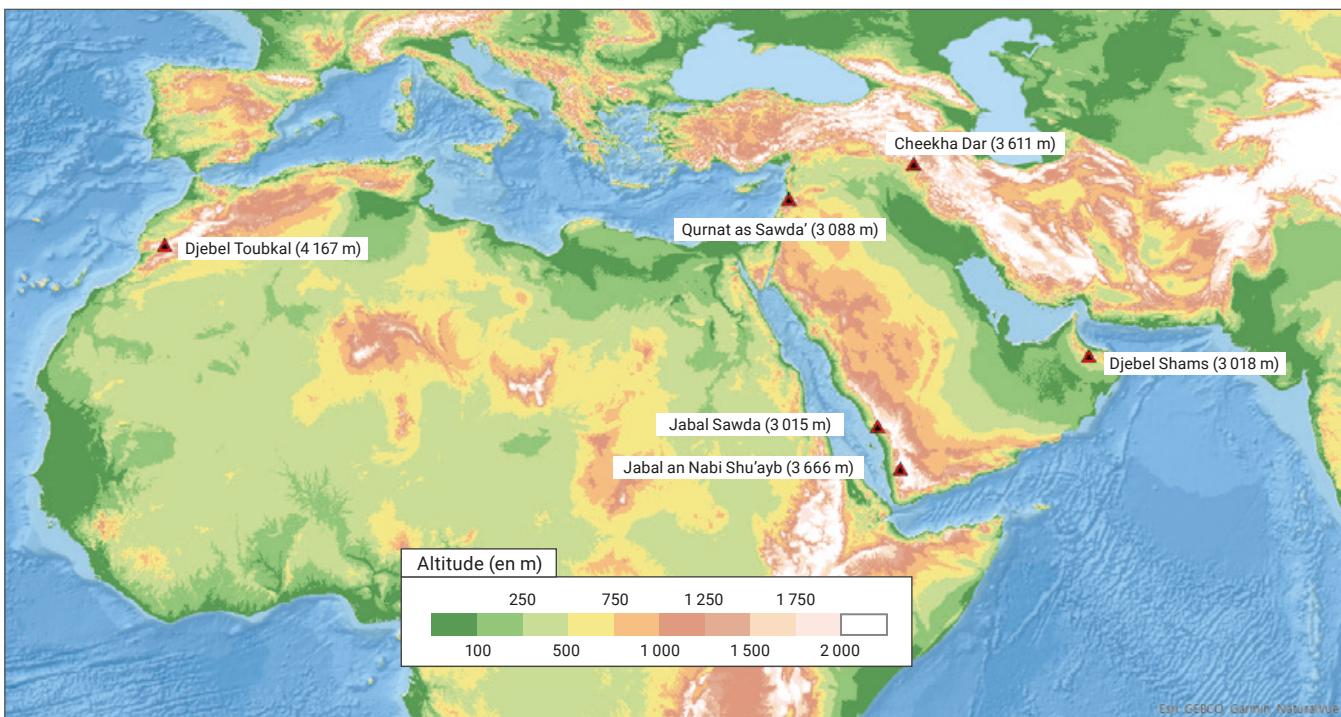


Source : adapté de CESAO (2022, fig. 9, p. 28).

Près d'un tiers de la population arabe réside à plus de 600 mètres d'altitude¹⁹. Les chutes de neige s'accumulent au sommet de plusieurs montagnes pendant l'hiver, notamment le mont Liban, le Haut Atlas, les monts Zagros et les monts Asir (figure 7.8). Avec la hausse des températures au printemps, ce manteau neigeux fond et alimente les cours d'eau, les réservoirs et les aquifères situés à plus basse altitude. L'eau de fonte peut jouer un rôle crucial pour le secteur agricole, en particulier pendant l'été, pour irriguer les cultures lorsque les précipitations sont limitées. La chaîne du mont Liban, qui s'étend quasiment sur toute la longueur du territoire du Liban, et la chaîne de l'Atlas, en Afrique du Nord, qui traverse l'Algérie, le Maroc et la Tunisie avant d'atteindre son point culminant au Maroc constituent de telles zones montagneuses.

¹⁹ Calculs réalisés par les auteurs selon les données du système d'information géographique.

Figure 7.8 Sommets et chaînes de montagnes dans la région arabe



Source : auteurs.

• • •

Les montagnes de la région arabe sont souvent négligées en dépit de leur rôle majeur dans l'apport de ressources en eau et d'autres services écosystémiques

7.5.1 Impacts du changement climatique sur la couverture neigeuse

L'eau de fonte provenant du manteau neigeux est une ressource en eau précieuse pour les régions côtières de basse altitude et les plaines intérieures, qui constituent des centres démographiques et économiques dans la région arabe. L'équivalent en eau de la neige (EEN) – l'équivalent hydrologique de l'eau liquide disponible dans le manteau neigeux – peut fournir des informations essentielles à la mise en œuvre de mesures appropriées de gestion de l'eau (voir section 2.1.1). Une diminution de l'EEN entraîne une diminution de la disponibilité des ressources en eau dépendantes de la neige, telles l'eau pour la recharge des nappes phréatiques, les sources et l'humidité du sol.

Au sein de la région arabe, certaines sources alimentées par des aquifères, comme la source Assal au Liban, sont principalement alimentées par la fonte des neiges (Doummar et al., 2018). Au Liban, on estime que la neige apporte 50 % à 60 % du volume d'eau des rivières et des sources, qui alimente les aquifères souterrains (Shaban, 2020). Toutefois, estimer l'EEN en fonction d'estimations approximatives de l'épaisseur et de la densité de neige prend beaucoup de temps (Fayad, 2019). Si des données sur l'EEN existent rarement pour la région arabe, la durée et l'épaisseur de la couverture neigeuse peuvent servir de bons indicateurs de remplacement (Sturm et al., 2010).

Compte tenu de la hausse prévue des températures causée par le changement climatique (jusqu'à 3,5 °C et 4,5 °C au mont Liban et dans les montagnes de l'Atlas respectivement d'ici à 2100, sur la base de la période de référence 1986-2005 ; CESAO et al., 2017), on s'attend à ce que les chutes de neige saisonnières et les précipitations globales diminuent, entraînant une modification de la durée et de l'épaisseur du manteau neigeux ainsi que la disponibilité globale des ressources en eau douce. Les estimations historiques obtenues par télédétection sur le mont Liban indiquaient qu'environ deux tiers des précipitations provenaient des chutes

• • •

La réduction de la durée et de l'épaisseur de la couverture neigeuse affectera sévèrement la disponibilité globale de l'eau

de neige, totalisant une moyenne annuelle de 40 à 43 cm d'EEN (Shaban et al., 2004). Des mesures *in situ* effectuées ultérieurement ont révélé que la durée de la couverture neigeuse, à des altitudes supérieures à 2 700 mètres, était d'environ 160 jours et que l'épaisseur de la neige était de 50 à 80 cm, ce qui équivaut à 36 à 158 cm d'EEN (Fayad et al., 2017). De même, la durée de la couverture neigeuse en haute altitude dépasse généralement 90 jours sur les montagnes de l'Atlas, ce qui se traduit par 20 cm d'EEN et plus de 80 cm d'EEN lors des années humides (Hanich et al., 2022).

Les résultats de la modélisation climatique régionale réalisée par EURO-CORDEX (Jacob et al., 2013) ont servi à évaluer les impacts du changement climatique sur la durée de la couverture neigeuse et sur l'épaisseur de la neige sur le mont Liban et dans l'Atlas. Le périmètre allait de l'Afrique du Nord jusqu'à la Méditerranée orientale avec une résolution spatiale de 12,5 kilomètres. Les modèles ont été sélectionnées selon qu'ils permettaient d'analyser la durée et l'épaisseur de la couverture neigeuse (Frei et al., 2018) ; ils comprenaient deux scénarios basés sur des profils de concentration représentatifs (RCP4.5 et RCP8.5).

Sur le mont Liban et dans l'Atlas, les projections montrent une tendance générale à la baisse de l'accumulation de neige qui devrait même pratiquement cesser d'ici à la fin du siècle. On prévoit que la durée de la couverture neigeuse se réduise de 7 à 10 % par décennie sur le mont Liban (figure 7.9) et de 6 à 10 % dans l'Atlas (figure 7.10). De même, l'épaisseur de la neige devrait diminuer de 9 % par décennie sur ces deux sites (figures 7.11 et 7.12).

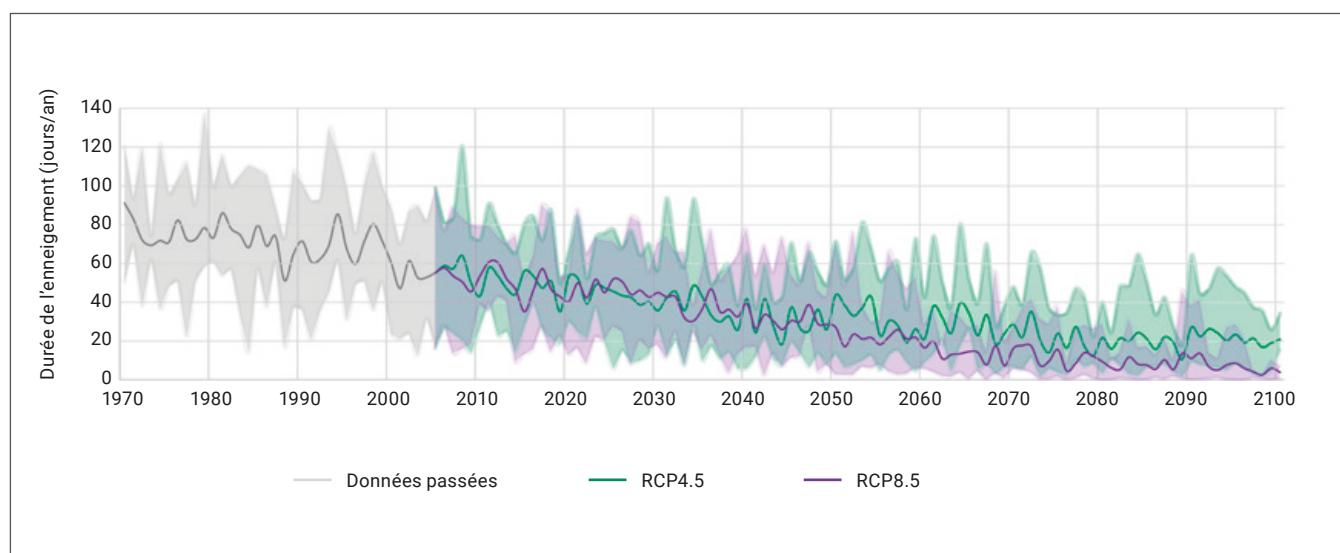
Une étude menée sur le mont Liban va dans le même sens et prévoit que la limite des neiges persistantes, qui atteint 1 500 mètres au-dessus du niveau de la mer, passe à 1 700 mètres d'ici à 2050 et à 1 900 mètres d'ici à 2090. Outre le recul du niveau d'enneigement, la neige fendra plus tôt au printemps, ce qui affectera la recharge des aquifères et le débit des sources, réduisant ainsi l'approvisionnement en eau d'irrigation (Ministère libanais de l'environnement/PNUD/GEF, 2015). Ces prévisions de réduction du manteau neigeux annoncent une diminution globale des approvisionnements en eau, en particulier pendant la saison sèche, lorsque l'irrigation en a le plus besoin. Sur le long terme, les services d'eau, d'assainissement et d'hygiène pourront également être dégradés par la réduction générale des ressources hydriques.

7.5.2 Les mesures d'adaptation

La réduction de la durée et de l'épaisseur de la couverture neigeuse affectera sévèrement l'hydrologie nivale, l'EEN et la disponibilité globale de l'eau. Des mesures d'adaptation judicieuses s'imposent donc. Le sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a recensé plusieurs conditions à remplir pour permettre l'adaptation au changement climatique dans la région arabe. Il s'agit notamment du renforcement des capacités afin que les répercussions du changement climatique soient mieux connues, de l'autonomisation des groupes vulnérables (telles les femmes et les communautés rurales) en tant qu'acteurs clés et du recours à des plateformes de prévision et de prédiction (GIEC, 2022).

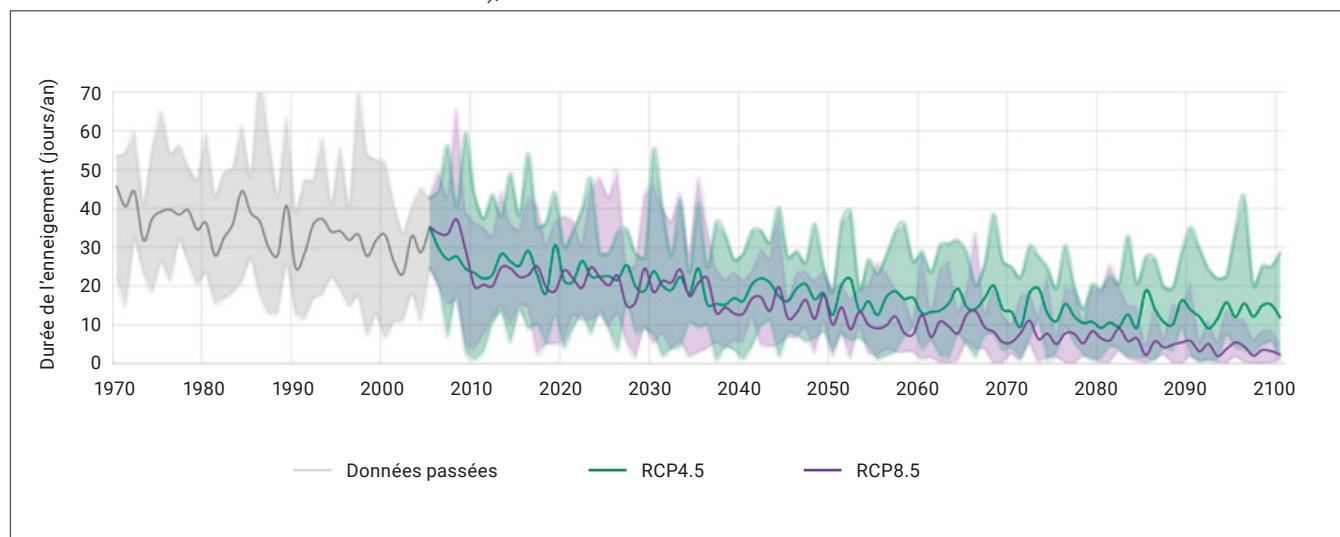
Le secteur des services (dont le tourisme hivernal) emploie 63 % des femmes actives au Liban. Il est donc crucial de soutenir les femmes en renforçant leurs capacités et en financement de nouvelles activités économiques qui leur offrent la possibilité de s'adapter à la baisse prévue des chutes de neige et à ses répercussions sur les activités touristiques hivernales (CESAO/FNUAP/Commission nationale de la femme libanaise, 2022). Les femmes constituent également 43 % de la main-d'œuvre agricole du pays et auront donc besoin de programmes et de financements qui les aident à compenser les répercussions d'une réduction de la fonte des neiges sur les ressources en eau d'irrigation et sur leurs revenus (ONU Femmes, 2023).

Figure 7.9 Répartition chronologique de la durée de l'enneigement annuel sur le mont Liban (plus de 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer), 1970-2100



Source : auteurs, à partir d'un ensemble de six résultats de modélisation climatique régionale EURO-CORDEX.

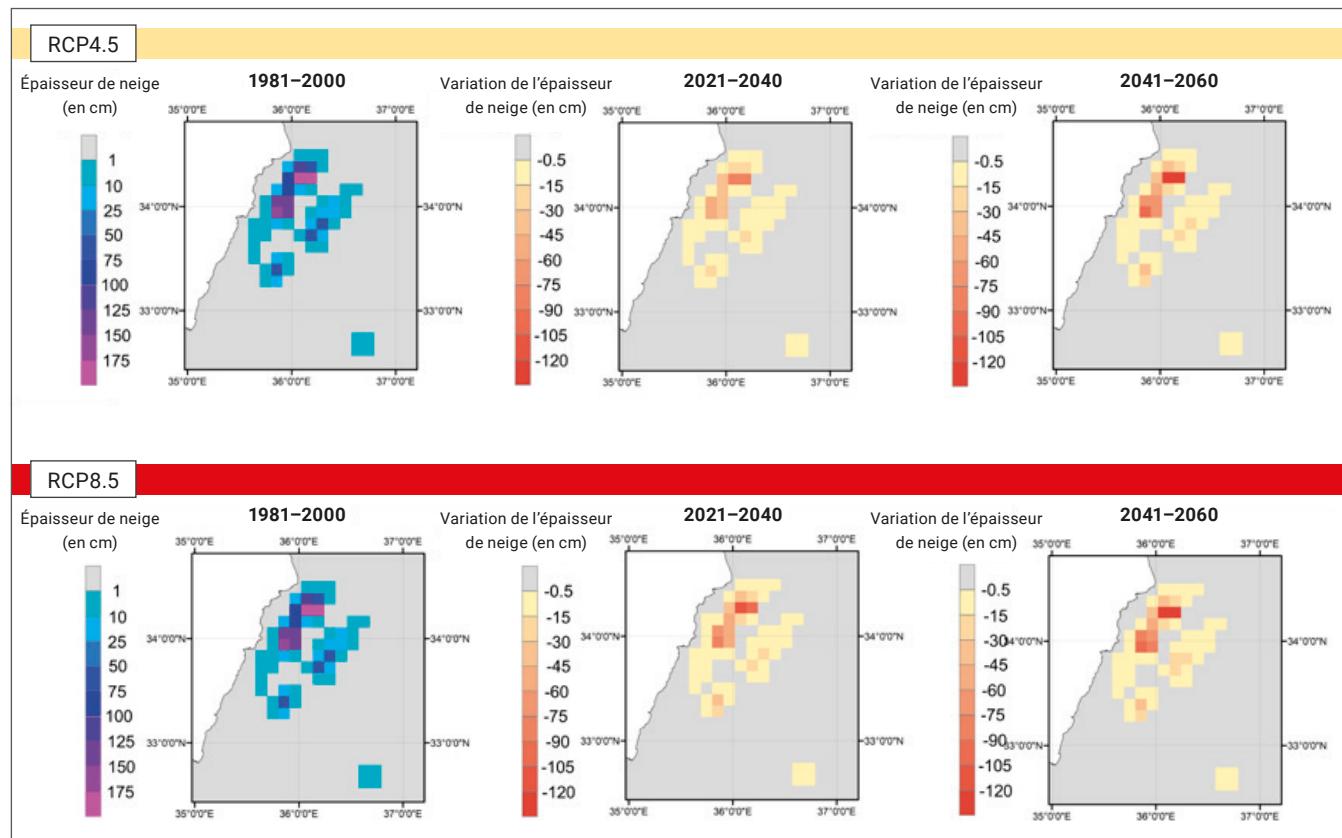
Figure 7.10 Répartition chronologique de la durée de l'enneigement annuel dans les montagnes de l'Atlas (plus de 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer), 1970-2100



Source : auteurs, à partir d'un ensemble de six résultats de modélisation climatique régionale EURO-CORDEX.

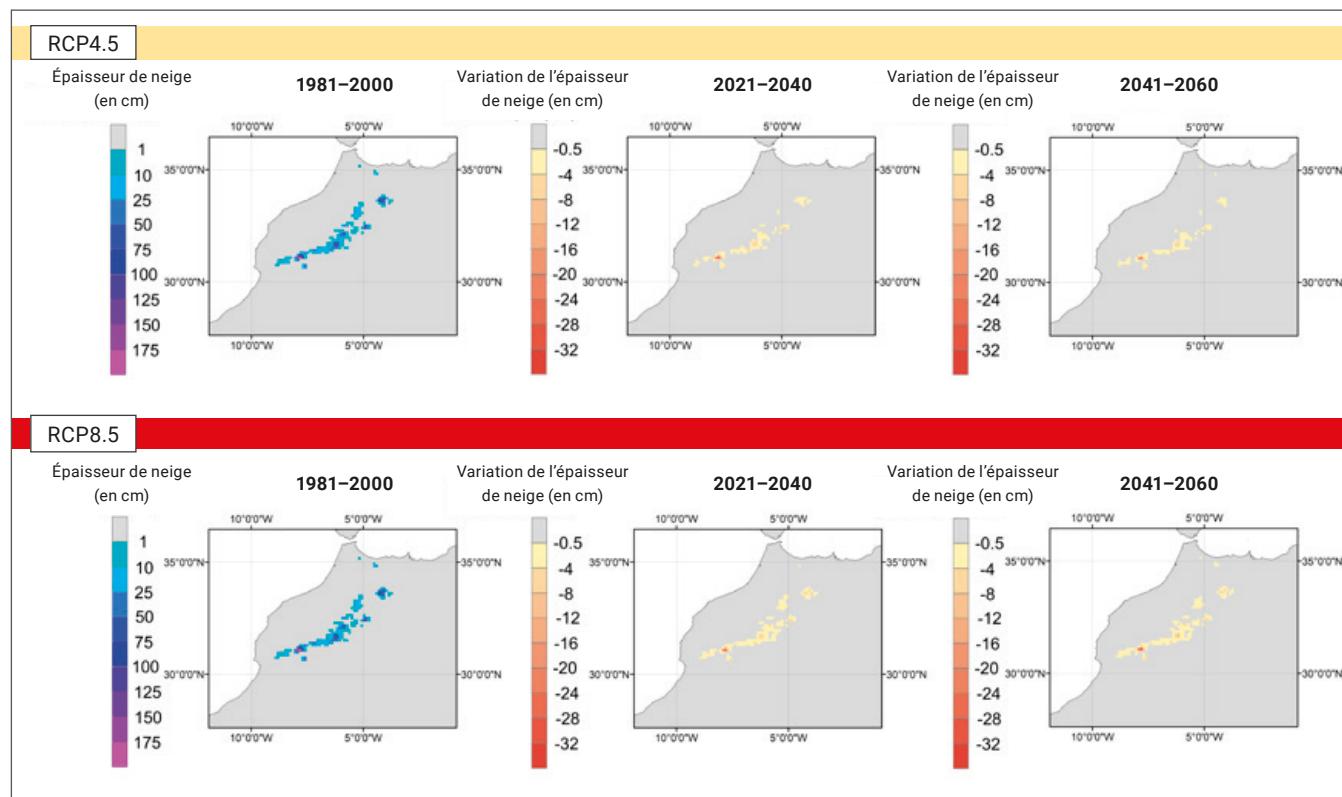
Un kit pour la conception d'une gestion des bassins hydrographiques résiliente au changement climatique, établi à partir des modèles de prévision climatique réalisés par l'Initiative régionale pour l'évaluation des répercussions des changements climatiques sur les ressources en eau et la vulnérabilité socioéconomique dans la région arabe, a été exploité pour le bassin du Nahr el-Kalb au Liban, qui comprend une partie du mont Liban. La municipalité de Mzaar Kfardebian, nommée capitale du tourisme hivernal du monde arabe en 2024, se trouve dans ce bassin. Les communautés qui dépendent de ce type de tourisme sur le plan économique pâtiront des répercussions négatives du changement climatique, qui devraient inclure une baisse de revenus pour les foyers concernés, du fait d'une saison de ski écourtée et d'une diminution de la fréquentation touristique.

Figure 7.11 Évolution de l'épaisseur moyenne saisonnière de la neige (octobre à mars) sur le mont Liban pour les périodes 1981-2000, 2021-2040 et 2041-2060



Source : auteurs, à partir d'un ensemble de six résultats de modélisation climatique régionale EURO-CORDEX.

Figure 7.12 Évolution de l'épaisseur moyenne saisonnière de la neige (octobre à mars) dans les montagnes de l'Atlas pour les périodes 1981-2000, 2021-2040 et 2041-2060



Source : auteurs, à partir d'un ensemble de six résultats de modélisation climatique régionale EURO-CORDEX.

• • •

La gestion de la recharge des aquifères est une autre mesure d'adaptation qui peut être employée

Le kit de conception propose plusieurs interventions, dont la diversification des moyens de subsistance par le biais d'un tourisme durable au-delà des activités hivernales. Cela passe notamment par la promotion de l'agrotourisme et de l'écotourisme proposés tout au long de l'année. Il est aussi conseillé aux décideurs politiques d'identifier et de cartographier les attractions locales, de fournir des financements et des formations aux entreprises locales, de développer les infrastructures nécessaires (réhabilitation des sentiers de randonnée) et de fournir des supports de communication appropriés afin d'attirer les visiteurs. Le bassin comprend également des terres agricoles, dont des pommiers et d'autres arbres fruitiers. La construction d'un lac (réservoir) est recommandée parce qu'elle constitue une option réalisable financièrement et permet d'augmenter le stockage de l'eau, contribuant à l'irrigation pendant la saison sèche prolongée (CESAO/ACSAD/Ministère libanais de l'énergie et de l'eau/FAO, 2022). Il s'agit là d'un exemple du travail effectué pour assister les populations et les communautés montagnardes alors qu'elles sont confrontées aux effets irréversibles du changement climatique et à l'épuisement de précieuses ressources hydriques. Les activités suggérées peuvent aussi contribuer à l'atténuation des répercussions environnementales négatives du tourisme de masse hivernal, responsable de l'augmentation de la pollution, de la déforestation et d'une baisse de la qualité de la neige dans des régions du Liban comme Tannourine (Delly, 2024).

Dans des situations similaires, la gestion de la recharge des aquifères est une autre mesure d'adaptation qui peut être employée. La collecte d'eau en hiver peut ainsi permettre de compenser une moindre disponibilité de l'eau en été résultant des effets du changement climatique, notamment la perte du manteau neigeux, sur les régions montagneuses de la région arabe.

Au Maroc, il conviendrait de mieux adapter les stratégies de développement rural afin d'améliorer la résilience des territoires et des moyens de subsistance au changement climatique au fur et à mesure que ce phénomène affecte l'enneigement et la disponibilité de l'eau dans les communautés de montagne. Pour ce faire, il est indispensable d'améliorer la disponibilité des données qui reflètent les différentes visions et priorités des acteurs ruraux en matière de développement. Depuis sa création en 2008, le Plan Maroc Vert permet l'émergence d'une nouvelle politique de gestion des ressources naturelles et de promotion des savoirs autochtones en matière de gestion des écosystèmes. Il encourage les mesures d'adaptation au changement climatique et cherche également à améliorer l'agriculture à petite échelle dans les zones marginales par le biais de subventions pour la plantation d'arbres sur les terrains en pente et de la mise en œuvre de techniques économies en eau, telle l'irrigation au goutte-à-goutte, en tant que réponse adaptative au changement climatique et à la diminution à venir des ressources en eau disponibles (Agence pour le Développement Agricole, Gouvernement du Maroc, s.d.). Ces mesures ne peuvent être mises en place qu'avec une gestion intégrée des ressources environnementales (eau, forêts, sols, etc.) à l'échelle des grands bassins hydrographiques dans l'optique de faire face aux variations de la disponibilité et de la demande en eau dans les zones de montagne et de plaine.

7.5.3 Conclusions

Les répercussions du changement climatique sur les chutes de neige et les précipitations saisonnières, et de fait sur la disponibilité globale de l'eau dans la région arabe, sont déjà visibles et risquent de s'intensifier de plus en plus à l'avenir. Le manteau neigeux joue un rôle déterminant dans le stockage de l'eau qui sera libérée au cours de la saison sèche. Il disparaît toutefois en raison du changement climatique. Pour les communautés montagnardes de la région arabe, et plus particulièrement au Liban et au Maroc, cette situation va affecter les activités économiques telles que le tourisme et l'agriculture. Pour pouvoir aller de l'avant, des mesures intersectorielles d'adaptation au climat s'imposent, au rang desquelles des solutions fondées sur la nature, des techniques d'irrigation et de sélection des cultures optimisées ainsi que des stratégies de diversification économique intelligentes.

Références

Adhikari, U., Nejadhashemi, A. P. et Herman, M. R. 2015. « A review of climate change impacts on water resources in East Africa ». *Transactions of the ASABE*, vol. 58, n° 6, p. 1493 à 1507. doi.org/10.13031/trans.58.10907.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G., Morecroft, M., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Agence de gestion des bassins versants du Bug occidental et du Sian en Ukraine. Non publié. Kruta, informations obtenues auprès de Kruta N., responsable adjoint de l'Agence de gestion des bassins versants du Bug occidental et du Sian, communication privée, 14 mai 2024.

Agence pour le Développement Agricole, Gouvernement du Maroc. s.d. « Approches de mise en œuvre des deux piliers du PMV ». Site web de l'Agence pour le Développement Agricole. www.ada.gov.ma/fr/approches-de-mise-en-oeuvre-des-deux-piliers-du-pmv.

Aguas Andinas. 2024. *Resumen de Información ESG* [Résumé d'information ESG]. www.aguasandinasversionistas.cl/~media/Files/A/Aguas-IR-v2/sustainability-reports/es/2023/ESG%20INFORMATION%20SUMMARY%202023%20sv%20-%20Espaol.pdf (en espagnol).

AIE (Agence internationale de l'énergie). 2021. *Climate Impacts on Latin American Hydropower*. Paris, AIE. www.iea.org/reports/climate-impacts-on-latin-american-hydropower.

Alberton, M., Andresen, M., Citadino, F., Egerer, H., Fritsch, U., Götsch, H., Hoffmann, C., Klemm, J., Mitrofanenko, A., Musco, E., Noellenburg, N., Pettita, M., Renner, K. et Zebisch, M. 2017. *Outlook on Climate Change Adaptation in the Carpathian Mountains*. Collection Mountain Adaptation Outlook. Nairobi/Vienne/Arendal, Norvège/Bolzano, Italie, Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)/Centre GRID-Arendal/Eurac Research. www.grida.no/publications/381.

Alford, D., Kamp, U. et Pan, C. 2015. *The Role of Glaciers in the Hydrologic Regime of the Amu Darya and Syr Darya Basins*. Rapport n° ACS12128. Washington, Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/94d8d53f-c8ff-53c7-899b-3d01f5eb8c85/content.

Altomonte, H. et Sánchez, R. J. 2016. *Hacia una Nueva Gobernanza de los Recursos Naturales en América Latina y el Caribe*. [Vers une nouvelle gouvernance des ressources naturelles en Amérique latine et dans les Caraïbes] Livres de la CEPAL n° 139. LC/G.2679-P. Santiago, Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC). www.cepal.org/es/publicaciones/40157-nueva-gobernanza-recursos-naturales-america-latina-caribe (en espagnol).

Alweny, S., Nsengiyumva, P. et Gatarabirwa, W. 2014. *Africa Sustainable Mountain Development Technical Report No. 1*. Kampala/Cambridge, Royaume-Uni, Société de conservation du rift albertin (ARCOS). doi.org/10.13140/RG.2.2.11656.16640.

Ariza, C., Maselli, D. et Kohler, T. 2013. *Mountains: Our Life, Our Future. Progress and Perspectives on Sustainable Mountain Development from Rio 1992 to Rio 2012 and Beyond*. Berne, Direction suisse du développement et de la coopération (DDC)/Centre pour le développement et l'environnement (CDE). boris.unibe.ch/47827/1/Mountain_Synthesis_Report.pdf.

Autorité de gestion du bassin hydrographique du Dniestr. 2024. 3 Міжнародним днем Дністра! [Bonne journée internationale du Dniestr !]. Site web de l'Autorité de gestion du bassin hydrographique du Dniestr. vodaif.gov.ua/z-mizhnarodnym-dnem-dnistra-2/ (en ukrainien ; consulté le 27 novembre 2024).

Awange, J. 2022. « GHA's water tower: Ethiopian highlands ». *Food Insecurity & Hydro-Climate in Greater Horn of Africa: Potential for Agriculture Amidst Extremes*. Cham, Suisse, Springer, p. 107 à 142. doi.org/10.1007/978-3-030-91002-0_6.

Banks, J. R., Heinold, B. et Schepanski, K. 2022. « Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life-cycle ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 127, n° 21, article e2022JD036618. doi.org/10.1029/2022JD036618.

Banque mondiale. 2023. « Madagascar : un soutien déterminant aux réformes foncières et à l'agriculture ». Fiches de résultats. Site web de la Banque mondiale. www.banquemondiale.org/fr/results/2023/11/19-madagascar-making-an-impact-on-land-reform-and-agriculture.

—. s.d. Groupe de la Banque mondiale. Données. « Agriculture, valeur ajoutée (% du PIB) - Madagascar ». Site web de la Banque mondiale. donnees.banquemondiale.org/indicateur/NV.AGR.TOTL.ZS?end=2023&locations=MG&start=2023&view=bar (consulté le 29 novembre 2024).

BID (Banque interaméricaine de développement). 2020. *Impactful Innovations: Lessons from Family Agriculture on Adaptation to Climate Change in Latin America and the Caribbean*. 2015 Competition for Successful Cases. Washington, BID. publications.iadb.org/es/publications/english/viewer/Impactful-Innovations-Lessons-from-Family-Agriculture-on-Adaptation-to-Climate-Change-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf.

Bodin, X. 2019. « Impactos de la evolución de los glaciares rocosos en los Andes semi-áridos » [Impacts de l'évolution des glaciers de roches dans les Andes semi-arides]. M. Turrel, *Luis Lliboutry -- El Hombre que Descifró los Glaciares* [Luis Lliboutry – L'homme qui a décodé les glacières]. Santiago, Aguas Andinas, p. 241 à 242. hal.science/hal-03083932 (en espagnol).

Bown, F., Rivera, A. et Acuña, C. 2008. « Recent glacier variations at the Aconcagua basin, Central Chilean Andes ». *Annals of Glaciology*, vol. 48, p. 43 à 48. doi.org/10.3189/172756408784700572.

Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A., Martin, L., Miralles, F. et Muñoz, R. 2020. *Agua para el Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica para América Latina y el Caribe* [De l'eau pour l'avenir : Stratégie en matière de sûreté de l'approvisionnement en eau pour l'Amérique latine et les Caraïbes]. Banque interaméricaine de développement (BID). doi.org/10.18235/0002816 (en espagnol).

Cajar. 2024. Alerta urgente: Sobre desplazamiento forzado masivo del pueblo Wiwa de la Sierra Nevada de Santa Marta [Alerte urgente : sur le déplacement forcé massif du peuple Wiwa de la Sierra Nevada de Santa Marta]. Site web de Cajar, 27 février 2024. www.colectivodeabogados.org/organizaciones-de-derechos-humanos-denunciamos-desplazamiento-masivo-del-pueblo-indigena-wiwa-de-la-snsm-alerta-urgente/ (en espagnol).

Canal Capital. 2023. ¿De dónde viene el agua que consumimos en Bogotá? [D'où vient l'eau que nous consommons à Bogota ?]. Site web de Canal Capital, 30 août 2023. www.canalcapital.gov.co/eureka/donde-viene-el-agua-de-bogota (en espagnol).

Canales Sierra, L. 2018. *Construcción de Diques para la Cosecha de Agua en Lagunas Periglaciares* [Construction de barrages pour la collecte d'eau dans les lagunes périglaciaires]. Lima, CARE Pérou (en espagnol).

Capitani, C., Garedew, W., Mitiku, A., Berecha, G., Hailu, B. T., Heiskanen, J., Hurskainen, P., Platts, P. J., Siljander, M., Pinard, F., Johansson, T. et Marchant, R. 2019. « Views from two mountains: Exploring climate change impacts on traditional farming communities of Eastern Africa highlands through participatory scenarios ». *Sustainability Science*, vol. 14, p. 91 à 203. doi.org/10.1007/s11625-018-0622-x.

Caretta, M. A., Mukherji, A., Arfanuzzaman, M., Betts, R. A., Gelfan, A., Hirabayashi, Y., Lissner, T. K., Liu, J., Lopez Gunn, E., Morgan, R., Mwanga, S. et Supratid, S. 2022. « Water ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 551 à 712. doi.org/10.1017/9781009325844.006.

CAWater-info (Portail d'information sur les problématiques relatives à l'eau et à l'environnement en Asie centrale). s.d. « Knowledge Base. Degradation of Glaciers ». Site web de CAWater-info. Commission inter-États pour la coordination de l'utilisation des ressources en eau. cawater-info.net/bk/7-3.htm (en russe, consulté le 27 novembre 2024).

CEPALC (Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes). 2024. CEPALSTAT : Bases de données et publications. Site web de la CEPALC. statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=2&lang=en (consulté le 10 juin 2024).

CESAO (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale). 2022. *Groundwater in the Arab Region – ESCWA Water Development Report 9*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. www.unescwa.org/publications/water-development-report-9.

CESAO (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale) et al. 2017. *Arab Climate Change Assessment Report – Main Report*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. www.unescwa.org/publications/riccarab-climate-change-assessment-report.

CESAO/ACSD/Ministère libanais de l'énergie et de l'eau/FAO (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale/Centre arabe pour l'étude des zones arides et semi-arides/Ministère libanais de l'énergie et de l'eau/Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 2022. *Climate-Proof Watershed Management Design and Resilience Package: Nahr el Kalb Basin*. Rapport technique de l'Initiative régionale pour l'évaluation des répercussions des changements climatiques sur les ressources en eau et la vulnérabilité socioéconomique dans la région arabe. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/climate-proof-watershed-management-design-resilience-nahr-el-kalb_0.pdf.

CESAO/FNUAP/Commission nationale de la femme libanaise (Commission économique et sociale pour l'Asie occidentale/Fonds des Nations Unies pour la population/Commission nationale de la femme libanaise). 2022. *Women's Economic Participation in Lebanon: A Mapping Analysis of Laws and Regulations*. Beyrouth, Organisation des Nations Unies. www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/women-economic-participation-lebanon-mapping-analysis-laws-english.pdf.

CESAP/PNUOIT/Centre régional de collaboration Asie-Pacifique de la CCNUCC/ONUDI (Commission économique et sociale pour l'Asie et le Pacifique/Programme des Nations Unies pour l'environnement/Organisation internationale du Travail/Centre régional de collaboration Asie-Pacifique de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques/Organisation des Nations Unies pour le développement industriel). 2023. *2023 Review of Climate Ambition in Asia and the Pacific: Just Transition Towards Regional Net-zero Climate Resilient Development*. Organisation des Nations Unies. www.unescap.org/kp/2023/2023-review-climate-ambition-asia-and-pacific-just-transition-towards-regional-net-zero.

Chaperon, P., Danloux, J. et Ferry, L. 1993. *Fleuves et rivières de Madagascar – Ony sy renirano eto Madagasikara*. Collection Monographies hydrologiques, n°10. Paris, ORSTOM (en français).

Chen, Z., Gao, X. et Lei, J. 2022. « Dust emission and transport in the Aral Sea region ». *Geoderma*, vol. 428, article 116177. doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116177.

CHR (Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin). 2022. « When the Melt Water is Missing: More Often Low Water Expected in the Rhine in the Future ». Site web du CHR, 11 juillet 2022. www.chr-khr.org/en/news/when-melt-water-missing-more-often-low-water-expected-rhine-future.

Climate-ADAPT. 2024. « Adaptation in Carpathian Mountains ». Site web de Climate-ADAPT. climate-adapt.eea.europa.eu/en/countries-regions/transnational-regions/carpathian-mountains/general (consulté le 12 novembre 2024).

Climate Diplomacy. 2022. « How Much Progress Has Been Made on Kyrgyz-Uzbek Water Cooperation? ». Site web de Climate Diplomacy, 1 juillet 2022. climate-diplomacy.org/magazine/cooperation/how-much-progress-has-been-made-kyrgyz-uzbek-water-cooperation.

Comité exécutif du Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral. 2024. « Water Resources ». Site web du Comité exécutif du Fonds international pour le sauvetage de la mer d'Aral. ecifas.kz/en/drugie-resursy/vodnye-resursy-basseyna-aralskogo-morya.

Commission de l'environnement et des biens nationaux du Chili. 2022. Proyecto de Ley. Sobre Protección de Glaciares [Projet de loi sur la protection des glaciers]. Boletines No. 11 876-12 et Refundido 4 205-12. Congrès national du Chili. www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12397&prmBOLETIN=11876-12 (en espagnol).

Commission du Dniestr. 2024a. « Working Group on Ecosystems and Biodiversity ». Site web de la Commission du Dniestr. dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-ecosystems-and-biodiversity/.

—. 2024b. « Working Group on Emergencies ». Site web de la Commission du Dniestr. dniester-commission.org/en/joint-management/dniester-commission/working-groups/working-group-on-emergencies/.

Commission du Mékong. s.d. « Hydrometeorological Monitoring ». Site web de la Commission du Mékong. www.mrcmekong.org/our-work/functions/basin-monitoring/hydrometeorological-monitoring/.

Commission internationale pour la protection du Rhin. 2022. « ICPDR to Start Updating Climate Change Adaptation Strategy in Autumn 2022: Third Extreme Low Water in 20 Years Underlines Urgency ». Site web de la Commission internationale pour la protection du Rhin, 15 septembre 2022. www.iksr.org/en/press/press-releases/press-releases-individual-presentation/iksr-beginnt-ab-herbst-2022-mit-aktualisierung-der-strategie-zur-anpassung-an-den-klimawandel-dritttes-extremes-niedrigwasser-in-20-jahren-unterstreicht-die-dringlichkeit?no_cache=1&sword_list%5B0%5D=glacier&chash=18f033335f10a05898b0ef4a1ce973a2.

Commission internationale pour la protection du Danube. 2014. « The ICPDR and its observers: Inspiring wider interaction with stakeholders ». *Danube Watch*, p. 25 à 27. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dw2014_1.pdf.

—. 2021. *Danube Flood Risk Management Plan: Update 2021*. Vienne, Commission internationale pour la protection du Danube. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/dfrmp_update_2021_lores_0.pdf.

Communauté de l'Afrique de l'Est/PNUE/Centre GRID-Arendal (Communauté de l'Afrique de l'Est/Programme des Nations Unies/Centre GRID-Arendal). 2016. *Sustainable Mountain Development in East Africa in a Changing Climate*. Collection Mountain Adaptation Outlook. Arusha, République-Unie de Tanzanie/Nairobi/Arendal, Norvège, Communauté de l'Afrique de l'Est/PNUE/Centre GRID-Arendal. www.grida.no/publications/119.

Cullen, N. J., Sirguey, P., Mölg, T., Kaser, G., Winkler, M. et Fitzsimmons, S. J. 2013. « A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded ». *The Cryosphere*, vol. 7, n°2, p. 419 à 431. doi.org/10.5194/tc-419-2013.

Delly, F. Z. 2024. « Balancing tourism and environmental conservation in Lebanon's changing climate ». *Beirut Political Review*, 28 février 2024. beirutpoliticalreview.org/publications/f/the-environment-tourism-and-lebanons-changing-climate.

Descroix, L., Faty, B., Manga, S. P., Diedhiou, A. B., Lambert, L. A., Soumaré, S., Andrieu, J., Ogilvie, A., Fall, A., Mahé, G., Sombily Diallo, F. B., Diallo, A., Diallo, K., Albergel, J., Tanimoun, B. A., Amadou, I., Bader, J. C., Barry, A., Bodian, A., Boulvert, Y., Braquet, N., Couture, J. L., Dacosta, H., Dejacquelot, G., Diakité, M., Diallo, K., Gallese, E., Ferry, L., Konaté, L., Nka Nomo, B.,

Olivry, J. C., Orange, D., Sakho, Y., Sambou, S. et Vandervaere, J. P. 2020. « Are the Fouta Djallon highlands still the water tower of West Africa? ». *Water*, vol. 12, n° 11, article 2968. doi.org/10.3390/w12112968.

Devenish, C. et Gianella, C. (éds). 2012. *20 years of Sustainable Mountain Development in the Andes: From Rio 1992 to 2012 and Beyond*. Rapport régional. Consortium pour le développement durable de l'écorégion andéenne (CONDESAN). openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/17b3c4fe-863e-4475-b12e-269d5578be58/content.

Dickerson, S., Cannon, M. et O'Neill, B. 2021. « Climate change risks to human development in Sub-Saharan Africa: A review of the literature ». *Climate and Development*, vol. 14, n° 6, p. 1 à 19. doi.org/10.1080/17565529.2021.1951644.

Doummar, J., Kassem, A. H. et Gurdak, J. J. 2018. « Impact of historic and future climate on spring recharge and discharge based on an integrated numerical modelling approach: Application on a snow-governed semi-arid karst catchment area ». *Journal of Hydrology*, vol. 565, p. 636 à 649. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.062.

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P. et Ruiz, L. 2019. « Two decades of glacier mass loss along the Andes ». *Nature Geoscience*, vol. 12, p. 802 à 808. doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5.

FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). 2000. Vingt-sixième Conférence régionale de la FAO pour l'Amérique latine et les Caraïbes, Mérida, Mexique, 10 au 14 avril 2000. Le Développement durable dans les zones montagneuses. www.fao.org/4/x4442e/x4442e.htm (en anglais).

—. 2015. *Mapping the Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity*. Rome, FAO. openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5175e.

—. s.d. Système d'information AQUASTAT. Site web de la FAO. data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en&share=f-97207b8a-f0f7-4b27-8a0b-64ba7477c4e4 (consulté le 20 novembre 2024).

FAO/PNUE (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture/Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2023. *Restoring Mountain Ecosystems: Challenges, Case Studies and Recommendations for Implementing the UN Decade Principles for Mountain Ecosystem Restoration*. Rome/Nairobi, FAO/PNUE. doi.org/10.4060/cc9044en.

Fayad, A. 2019. *Évaluation de la ressource en eau associée au manteau neigeux sur le mont Liban à partir d'observations et de la modélisation*. Thèse, hydrologie, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2017. NNT : 2017TOU30364. tel-01755397v2. theses.hal.science/tel-01755397v2.

Fayad, A., Gascoin, S., Faour, G., Fanise, P., Drapeau, L., Somma, J., Fadel, A., Al Bidar, A. et Escadafal, R. 2017. « Snow observations in Mount Lebanon (2011–2016) ». *Earth System Science Data*, vol. 9, n° 2, p. 573 à 587. doi.org/10.5194/essd-9-573-2017.

FIDA (Fonds international de développement agricole). s.d. « Madagascar ». Site web du FIDA. www.ifad.org/en/w/countries/madagascar (consulté le 2 décembre 2024).

Frazier, A. G. et Brewington, L. 2020. « Current changes in alpine ecosystems of Pacific Islands ». *Encyclopedia of the World's Biomes*, p. 607 à 619. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11881-0.

Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M. A. et Schär, C. 2018. « Future snowfall in the Alps: Projections based on the EURO-CORDEX regional climate models ». *The Cryosphere*, vol. 12, n° 1, p. 1 à 24. doi.org/10.5194/tc-12-1-2018.

Gagné, K., Rasmussen, M. B. et Orlove, B. 2014. « Glaciers and society: Attributions, perceptions, and valuations ». *Wiley Interdisciplinary Reviews (WIREs): Climate Change*, vol. 5, n° 6, p. 793 à 808. doi.org/10.1002/wcc.315.

García Pachón, M. P. 2018. *La Conservación de Glaciares y Humedales como Ecosistemas Proveedores de Agua Dulce a Través del SINAP* [Conservation des glaciers et des zones humides en tant qu'écosystèmes d'approvisionnement en eau douce par le biais du système national d'aires protégées (SINAP)]. A. Embid Irujo et M. P. García Pachón (éds), *La Conservación de la Naturaleza: Su Régimen Jurídico en Colombia y España* [La conservation de la nature et son régime juridique en Colombie et en Espagne]. Bogota, Université Externado de Colombie, p. 85 à 115. doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.2118 (en espagnol).

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H. et Veloso-Águila, D. 2019. « The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective ». *International Journal of Climatology*, vol. 40, n° 1, p. 421 à 439. doi.org/10.1002/joc.6219.

Ghosh, D. 2021. « Alps Mountain Range ». Site web de WorldAtlas, 18 mars 2021. www.worldatlas.com/mountains/alps-mountain-range.html.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds)]. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009325844.

GIZ (Agence de coopération internationale allemande pour le développement). 2023. *Regional Climate Change Adaptation Strategy for Central Asia*. Agence de coopération internationale allemande pour le développement. greencentralasia.org/en/regional-climate-change-adaptation-strategy-in-central-asia/.

—. s.d. *Regional Action Plan for a Joint Political Dialogue on Climate, Environment and Security*. Agence de coopération internationale allemande pour le développement. greencentralasia.org/en/category/regional-action-plan/.

Global Forest Watch. s.d. « Madagascar ». Site web de Global Forest Watch. www.globalforestwatch.org/dashboards/country/MDG/ (consulté le 2 décembre 2024).

González Molina, S. et Vacher, J.-J. (éds). 2014. *El Perú Frente al Cambio Climático: Resultados de Investigaciones Franco-peruanas* [Le Pérou face au changement climatique : Résultats des recherches françaises et péruviennes]. Institut de Recherche pour le Développement (IRD). repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/1029 (en espagnol).

Goodman, S. M., Raherilalao, M. J. et Wohlhauser, S. (éds). 2021. *Les aires protégées terrestres de Madagascar: leur histoire, description et biota*. Antananarivo, Association Vahatra (en français).

Gouvernement de l'Argentine. 2010. *Ley 26.639: Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial* [Loi 26.639 : Régime de budget minimum pour la préservation des glaciers et de l'environnement périglaciaire]. servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/170000-174999/174117/norma.htm (en espagnol).

Hanich, L., Chehbouni, A., Gascoin, S., Boudhar, A., Jarlan, L., Tramblay, Y., Boulet, G., Marchane, A., Baba, M. W., Kinnard, C., Simonneaux, V., Fakir, Y., Bouchaou, L., Leblanc, M., Le Page, M., Bouamri, H., Er-Raki, S. et Khabba, S. 2022. « Snow hydrology in the Moroccan Atlas Mountains ». *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 42, article 101101. doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101101.

ICIMOD (Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes). 2017. « Reaching the Most Vulnerable Across the Border: Community-Based Flood Early Warning Systems ». Site web de l'ICIMOD, 12 août 2017. www.icimod.org/article/reaching-the-most-vulnerable-across-the-border-community-based-flood-early-warning-systems/.

—. 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya*. Résumé. Katmandou, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.

—. 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal et J. F. Steiner (éds)]. Katmandou, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

—. s.d. Sommet ministériel sur les montagnes himalayennes de l'Hindou Kush 2020. Site web de l'ICIMOD. www.icimod.org/hkhmms/ (en anglais).

IDEAM (Institut d'hydrologie, de météorologie et d'études environnementales). 2021. *Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020* [Rapport sur l'état des glaciers colombiens 2020]. Bogota, IDEAM. www.siac.gov.co/glaciares (en espagnol).

Immerzeel, W. W., Lutz, A. F., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B. J., Elmore, A. C., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J. S., Koppes, M., Kraaijenbrink, P. D. A., Kulkarni, A. V., Mayewski, P. A., Nepal, S., Pacheco, P., Painter, T. H., Pellicciotti, F., Rajaram, H., Rupper, S., Sinisalo, A., Shrestha, A. B., Viveroli, D., Wada, Y., Xiao, C., Yao, T. et Baillie, J. E. M. 2020. « Importance and vulnerability of the world's water towers ». *Nature*, vol. 577, n° 7790, p. 364 à 369. doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y.

Initiative pour la recherche sur la montagne/GEO Working Group. 2023. *MRI Mountain Observatories Working Group & GEO Mountains Workshop in Central Asia: Workshop Report*. Almaty, Kazakhstan, 18 au 20 avril 2023. doi.org/10.48350/183023.

Jackson, M., Azam, M. F., Baral, P., Benestad, R., Brun, F., Muhammad, S., Pradhananga, S., Shrestha, F., Steiner, J. F. et Thapa, A. 2023. « Consequences of climate change for the cryosphere in the Hindu Kush Himalaya ». P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal et J. F. Steiner (éds), *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook*. Katmandou, Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD), p. 17 à 71. doi.org/10.53055/ICIMOD.1030.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Bøssing Christensen, O., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. et Yiou, P. 2013. « EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research ». *Regional Environmental Change*, vol. 14, p. 563 à 578. doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.

Jorio, L. et Reusser, K. 2019. « Glaciers and the Changing Landscape in the Alps ». Site web de Swissinfo.ch, 26 août 2019. www.swissinfo.ch/eng/sci-tech/swiss-glaciers-series-3-000-4-500-metres_glaciers-and-the-changing-landscape-in-the-alps/45181238.

JPL (Jet Propulsion Laboratory). 2004. « Photojournal ». Site web de JPL. Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA). photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia04965.

Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y. et Wang, H. 2020. « A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere ». *Earth-Science Reviews*, vol. 210, article 103346. doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346.

Kanui, I., Kibwage, T. et Murangiri, M. R. 2016. « Water tower ecosystems services and diversification of livelihood activities to neighbouring communities: A case study of Chyulu Hills water tower in Kenya ». *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, vol. 6, n° 4, p. 1 à 12. doi.org/10.9734/JGEESI/2016/26620.

Kennedy, C. M., Fariss, B., Oakleaf, J. R., Fa, J. E., Baruch-Mordo, S. et Kiesecker, J. 2023. « Indigenous Peoples' lands are threatened by industrial development: Conversion risk assessment reveals need to support Indigenous stewardship ». *One Earth*, vol. 6, p. 1032 à 1049. doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.006.

Kiplagat, J. K., Wang, R. Z. et Li, T. X. 2011. « Renewable energy in Kenya: Resource potential and status of exploitation ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 6, p. 2960 à 2973. doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.023.

Klein, R. J. T., Midgley, G. F., Preston, B. L., Alam, M., Berkhout, F. G. H., Dow, K. et Shaw, M. R. 2014. « Adaptation opportunities, constraints, and limits ». C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea and L. L. White (éds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 899 à 943. doi.org/10.1017/CBO9781107415379.021.

Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.-L. et Pergaud, J. 2020. « The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif ». *Scientific Reports*, vol. 10, article 10420. doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7.

Lourenco, M. et Woodborne, S. 2023. « Defining the Angolan Highlands Water Tower, a 40 plus-year precipitation budget of the headwater catchments of the Okavango Delta ». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 195, n° 7, p. 859. doi.org/10.1007/s10661-023-11448-7.

Magrin, G. O., Marengo, J. A., Boulanger, J.-P., Buckeridge, M. S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F. R. et Vicuña, S. 2014. « Central and South America ». V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea and L. L. White (éds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 1499 à 1566. www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartB_FINAL.pdf.

Mani, M. (éd.). 2021. *Glaciers of the Himalayas: Climate Change, Black Carbon, and Regional Resilience*. Forum de l'Asie du Sud sur les objectifs de développement. Washington, Banque internationale pour la reconstruction et le développement/Banque mondiale. openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/ff8b1264-d631-5d3d-814f-80f509c82aa9/content.

Ministère bolivien des affaires étrangères. 2023. « Bolivia fortalece el sistema de monitoreo de glaciares andinos » [La Bolivie renforce le système de surveillance des glaciers andins]. Site web du Ministère bolivien des affaires étrangères, 31 octobre 2023. cancilleria.gob.bo/mre/2023/10/31/11918/ (en espagnol).

Ministère chilien des biens nationaux. 2023. Decreto 25 - Crea el "Parque Nacional Glaciares de Santiago", en la Comuna de San José de Maipo, Provincia de Cordillera, Región Metropolitana [Décret 25 - Crédit du « Parc national des glaciers de Santiago » dans la commune de San José de Maipo, province de la Cordillère, zone métropolitaine]. Ministère chilien des biens nationaux. www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1195043 (en espagnol).

Ministère chilien des travaux publics. 2023. « Dirección General de Aguas del MOP instala dos nuevas estaciones glaciológicas en la región de Magallanes y de la Antártica Chilena » [La direction générale de l'eau du Ministère des travaux publics installe deux nouvelles stations glaciologiques dans la région de Magallanes et dans l'Antarctique chilien]. dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetailedeNoticias.aspx?item=1010.

Ministère équatorien de l'énergie et des mines. s.d. Ecuador consolida la producción eléctrica a partir de fuentes renovables [L'Équateur renforce sa production d'énergie renouvelables]. Site web du Ministère équatorien de l'énergie et des mines. www.recursosyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%2C%20entre%20otras (en espagnol).

Ministère libanais de l'environnement/PNUD/GEF (Ministère libanais de l'environnement/Programme des Nations Unies pour le développement/Global Environment Facility). 2015. *Economic Costs to Lebanon from Climate Change: A First Look*. Beyrouth, Ministère libanais de l'environnement/PNUD. www.studies.gov.lb/getattachment/Sectors/Environment/2016/ENV-16-11/env-16-11.pdf.

Ministère polonais du climat et de l'environnement. 2022. « Impact of War on Natural Environment of the Carpathians in Ukraine ». Département de conservation de la nature. www.gov.pl/attachment/9ed63b69-87d8-4c52-a74a-1c88385f5508.

Mosello, B., Foong, A., Viehoff, A. et Rüttinger, L. 2023. *Regional Consultation on Climate Change and Security in Central Asia*. Berlin/Vienne, Adelphi Research/Organisation pour la sécurité et la coopération en Europe (OSCE). adelphi.de/system/files/document/Regional%20consultation%20on%20climate%20change%20and%20security%20in%20central%20asia.pdf.

Mwangi, K. K., Musili, A. M., Otieno, V. A., Endris, H. S., Sabiiti, G., Hassan, M. A., Tsehayu, A. T., Guleid, A., Atheru, Z., Guzha, A. C., De Meo, T., Smith, N., Lubanga Makanji, D., Kerkering, J., Doud, B. et Kanyanya, E. 2020. « Vulnerability of Kenya's water towers to future climate change: An assessment to inform decision making in watershed management ». *American Journal of Climate Change*, vol. 9, n° 3, p. 317 à 353. doi.org/10.4236/ajcc.2020.93020.

Nsengiyumva, P. 2019. « African mountains in a changing climate: Trends, impacts, and adaptation solutions ». *Mountain Research and Development*, vol. 39, n° 2, p. 1 à 8. doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00062.1.

Nyingi, D. W., Gichuki, N. et Ogada, M. O. 2013. « Freshwater ecology of Kenyan highlands and lowlands ». P. Paron, D. O. Olago et C. T. Ormuto (éds), *Developments in Earth Surface Processes*, vol. 16, p. 199 à 218. doi.org/10.1016/B978-0-444-59559-1.00016-5.

Olmos, X. 2017. *Sostenibilidad Ambiental en las Exportaciones Agroalimentarias: Un Panorama de América Latina* [Durabilité environnementale des exportations agroalimentaires : un aperçu de l'Amérique latine]. Document de projet. Santiago, Commission économique des Nations Unies pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC). repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/a63d47d6-c0c5-4a0a-93bd-456f684d1739/content (en espagnol).

OMM (Organisation météorologique mondiale). 2022. *État du climat en Afrique 2021*. OMM, n° 1300. Genève, OMM. library.wmo.int/fr/records/item/55452-etat-du-climat-en-afrique-2021?language_id=15&back=&offset=0.

—. 2023. *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2022*. OMM, n° 1322. Genève, OMM. library.wmo.int/idurl/4/66252.

—. 2024a. *État du climat en Afrique 2023*. OMM, n° 1360. Genève, OMM. library.wmo.int/fr/records/item/69098-etat-du-climat-en-afrique-2023?language_id=15&back=&offset=0.

—. 2024b. « 1st Third Pole Climate Forum Consensus Statement (TPCF-1) ». Forum climatique régional sur le troisième pôle, Chine, 4-6 juin 2024. reliefweb.int/report/afghanistan/1st-third-pole-climate-forum-consensus-statement-tpcf-1-summary-climate-december-2023-april-2024-and-climate-outlook-june-september-2024.

Ontumbi, G. M. et Sanga, J. K. 2018. « Kenya's water towers: A scenario scrutiny of Njoro sub catchment, Eastern Mau towers ». *International Journal of Scientific and Technological Research (IJSTER)*, vol. 1, n° 1, p. 6 à 15.

ONU (Organisation des Nations Unies). 2024. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 – L'eau pour la prospérité et la paix*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388949.

—. s.d. « Progrès relatifs à la coopération dans le domaine des eaux transfrontières (cible 6.5 des ODD) ». Site web de SDG 6 Data. sdg6data.org/fr/indicator/6.5.2 (consulté le 3 septembre 2024).

ONU-Femmes. 2023. *Women in the Agro-Food Sector in Lebanon: A Review of the Legislative Framework*. Beyrouth, ONU-Femmes. arabstates.unwomen.org/sites/default/files/2023-12/psdp-legislativeframework.pdf.

Ownby, J. 2024. La crisis hídrica de Bogotá: "Solo nos puede salvar el cielo" [Crise de l'eau à Bogota : « Seul le ciel peut nous sauver »]. Site web d'*EPA*, 18 avril 2024. elpais.com/america-colombia/2024-04-18/la-crisis-hidrica-de-bogota-solo-nos-puede-salvar-el-cielo.html (en espagnol).

Partenariat de la montagne. 2013. *Pourquoi les montagnes sont une priorité pour l'énergie : un appel pour l'action sur les objectifs de développement durable (ODD)*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. www.fao.org/fileadmin/templates/mountain_partnership/doc/POLICY_BRIEFS/SDGs_and_mountains_energy_fr.pdf.

PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement). 2019. *DECOIN: Ecuador*. Cas d'étude d'Equator Initiative. New York, PNUD. www.equatorinitiative.org/wp-content/uploads/2019/12/DECOIN-Ecuador-1.pdf.

PNUD/Initiative ENVSEC (Programme des Nations Unies pour le développement/Initiative Environnement et sécurité). 2011. *The Glaciers of Central Asia: A Disappearing Resource*. PNUD. cawater-info.net/pdf/glaciers_of_central_asia.pdf.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2010. Afrique, Atlas de l'eau. Nairobi, Division de l'alerte rapide et de l'évaluation, PNUE.

—. 2012. *Sustainable Mountain Development. RIO 2012 and Beyond. Why Mountains Matter for Africa*. PNUE. openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1278fa8d-0853-4aef-a2af-c935cb643428/content.

—. 2014. *Africa Mountains Atlas*. Nairobi, PNUE. wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9301.

—. 2022a. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review*. EO/2466/NA. Nairobi, PNUE. wedocs.unep.org/20.500.11822/40746.

—. 2022b. *Une Évaluation scientifique de l'environnement troisième pôle*. Nairobi, PNUE. www.unep.org/resources/report/scientific-assessment-third-pole-environment (en anglais).

—. 2023a. « The Carpathian Convention Marks its 20th Anniversary with a New Biodiversity Framework and a Transboundary Protected Wetland ». Site web du PNUE, 12 octobre 2023. www.unep.org/news-and-stories/press-release/carpthian-convention-marks-its-20th-anniversary-new-biodiversity.

—. 2023b. « Shrinking Glaciers Upend Lives Across South America ». Site web du PNUE, 15 mars 2023. www.unep.org/news-and-stories/story/shrinking-glaciers-upend-lives-across-south-america.

Pohl, B., Kramer, A., Hull, W., Blumstein, S., Abdullaev, I., Kazbekov, J., Reznikova, T., Strikeleva, E., Interwies, E. et Görilitz, S. 2017. *Rethinking Water in Central Asia: The Costs of Inaction and Benefits of Water Cooperation*. Adelphi/CAREC. carecoco.org/Rethinking%20Water%20in%20Central%20Asia.pdf.

Prinz, R., Nicholson, L. I., Mölg, T., Gurgiser, W. et Kaser, G. 2016. « Climatic controls and climate proxy potential of Lewis Glacier, Mt. Kenya ». *The Cryosphere*, vol. 10, n° 1, p. 133 à 148. doi.org/10.5194/tc-10-133-2016.

Reyes Haczek, A. 2022. Venezuela ya se quedó sin glaciares. ¿Qué pasa en el resto de la región? [Le Venezuela a déjà perdu ses glacières. Qu'en est-il dans le reste de la région ?]. Site web de CNN, 5 août 2022. cnn.com/2022/08/05/glaciares-nivel-del-mar-america-latina-caribe-omm-orix/ (en espagnol).

Robbins, J. 2019. « The West's Great River Hits its Limits: Will the Colorado Run Dry? ». Site web de Yale Environment 360, 14 janvier 2019. e360.yale.edu/features/the-wests-great-river-hits-its-limits-will-the-colorado-run-dry.

Romeo, R., Grita, F., Parisi, F. et Russo, L. 2020. *Vulnerability of Mountain Peoples to Food Insecurity: Updated Data and Analysis of Drivers*. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CLD). doi.org/10.4060/cb2409en.

Ruggeri, A. 2023. « Could Giant Blankets and Other Extreme Actions Save Glaciers? ». Site web de *Scientific American*, 6 mars 2023. www.scientificamerican.com/article/could-giant-blankets-and-other-extreme-actions-save-glaciers/.

Russell, M. 2018. *Water in Central Asia: An Increasingly Scarce Resource*. Union européenne. [www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625181/EPRS_BRI\(2018\)625181_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625181/EPRS_BRI(2018)625181_EN.pdf).

Samaniego, J., Galindo, L. M., Mostacedo Marasovic, S. J., Ferrer Carbonell, J., Alatorre, J. E. et Reyes, O. 2017. *Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario en América Latina y el Caribe: Síntesis de Políticas Públicas sobre Cambio Climático* [Adaptation au changement climatique dans le secteur agricole en Amérique latine et dans les Caraïbes : synthèse des politiques publiques en matière de changement climatique]. Commission économique des Nations Unies pour l'Amérique latine et les Caraïbes (CEPALC). Santiago, ONU. www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesispp_cc_adaptacion_al_cambio_climatico_en_alac.pdf (en espagnol).

Schmitz, T. 2020. « Investing in ecosystems for water security: The case of the Kenya water towers ». R. C. Brears (éd.), *The Palgrave Handbook of Climate Resilient Societies*. Cham, Suisse, Palgrave Macmillan. doi.org/10.1007/978-3-030-32811-5_23-1.

Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hespding, M. et Verbist, K. 2018. *The Andean Glacier and Water Atlas – The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. Paris/Arendal, Norvège, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)/Centre GRID-Arendal. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810.

Secrétariat permanent de la Convention alpine. 2009a. *L'eau et la gestion des ressources en eau : Rapport sur l'état des Alpes*. Convention alpine. Signaux alpins - Édition spéciale 2. Résumé. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie. Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_summary_FR.pdf.

—. 2009b. *L'eau et la gestion des ressources en eau : Rapport sur l'état des Alpes*. Convention alpine : Signaux alpins - Édition spéciale 2. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie. Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA2_long_EN.pdf (en anglais).

—. 2019. *Gouvernance des risques naturels : Rapport sur l'état des Alpes*. Convention alpine : Signaux alpins – spéciale 7. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie. Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA7_FR.pdf.

—. 2022. *Programme de travail pluriannuel de la Conférence alpine 2023-2030*. Innsbruck, Autriche/Bolzano, Italie. Secrétariat permanent de la Convention alpine. www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organisation/AC/XVII/AC_MAP_2023-2030_fr_web.pdf.

Shaban, A. 2020. « Snow cover ». *Water Resources of Lebanon*. World Water Resources. vol. 7. Cham, Suisse, Springer. doi.org/10.1007/978-3-030-48717-1_5.

Shaban, A., Faour, G., Khawlie, M. et Abdallah, C. 2004. « Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon ». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 49, n° 4, p. 643 à 653. doi.org/10.1623/hysj.49.4.643.54432.

Shikuku, K. M., Winowiecki, L., Twyman, J., Eitzinger, A., Perez, J. G., Mwongera, C. et Läderach, P. 2017. « Smallholder farmers' attitudes and determinants of adaptation to climate risks in East Africa ». *Climate Risk Management*, vol. 16, p. 234 à 245. doi.org/10.1016/j.crm.2017.03.001.

Shrestha, F. 2023. « Glacial Lake Outburst Floods in High Mountain Asia Documented in Regional Effort ». Site web du Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes, 15 décembre 2023. www.icimod.org/media-advisory/glacial-lake-outburst-floods-in-high-mountain-asia Documented-in-regional-effort/.

Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevsky, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A. et Gleick, P. 2023. « Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure ». *Nature Sustainability*, vol. 6, p. 578 à 586. doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x.

Singh Shrestha, M. et Sherchan, U. 2018. « Communicating Flood Early Warning in the Ratu Watershed ». Site web du Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes, 30 juillet 2018. www.icimod.org/communicating-flood-early-warning-in-the-ratu-watershed/.

Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O. et Beniston, M. 2012. « Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia) ». *Nature Climate Change*, vol. 2, p. 725 à 731. doi.org/10.1038/nclimate1592.

Stecher, G., Hohensinner, S. et Hrenegger, M. 2023. « Changes in the water retention of mountainous landscapes since the 1820s in the Austrian Alps ». *Frontiers in Environmental Science* 11, vol. 11. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1219030.

Sturm, M., Taras, B., Liston, G. E., Derksen, C., Jonas, T. et Lea, J. 2010. « Estimating snow water equivalent using snow depth data and climate classes ». *Journal of Hydrometeorology*, vol. 11, n° 6, p. 1380 à 1394. doi.org/10.1175/2010JHM1202.1.

Takase, M., Kipkoech, R. et Essandoh, P. K. 2021. « A comprehensive review of energy scenario and sustainable energy in Kenya ». *Fuel Communications*, vol. 7, article 100015. doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100015.

Taylor, R. G., Mileham, L., Tindimugaya, C. et Mwebembezi, L. 2009. « Recent glacial recession and its impact on alpine riverflow in the Rwenzori Mountains of Uganda ». *Journal of African Earth Sciences*, vol. 55, n° 3 à 4, p. 205 à 213. doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.04.008.

Taylor, S. J., Ferguson, J. W. H., Engelbrecht, F. A., Clark, V. R., Van Rensburg, S. et Barker, N. 2016. « The Drakensberg Escarpment as the great supplier of water to South Africa ». *Developments in Earth Surface Processes*, vol. 21, p. 1 à 46. doi.org/10.1016/B978-0-444-63787-1.00001-9.

Torres, M. C., Naranjo, E., Fierro, V. et Carchipulla-Morales, D. 2023. « Social technology for the protection of the Páramo in the central Andes of Ecuador ». *Mountain Research and Development*, vol. 43, n° 4, p. D 1 à D11. doi.org/10.1659/mrd.2022.00022.

Travers, J. 2023. « Covering Glaciers with Blankets to Hide the Ice – and the Real Problem ». Site web de la Columbia Climate School, 13 janvier 2023. news.columbia.edu/2023/01/13/covering-glaciers-with-blankets-to-hide-the-ice-and-the-real-problem/.

Trisos, C. H., Adelekan, I. O., Totin, E., Ayanlade, A., Efitre, J., Gemedo, A., Kalaba, K., Lennard, C., Masao, C., Mgaya, Y., Ngaruiya, G., Olago, D., Simpson, N. P. et Zakieldeen, S. 2022. « Africa ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 1285 à 1455. doi.org/10.1017/9781009325844.011.

Umirbekov, A., Peña-Guerrero, M. D. et Müller, D. 2022. « Regionalization of climate teleconnections across Central Asian mountains improves the predictability of seasonal precipitation ». *Environmental Research Letters*, vol. 17, n° 5, article 055002. doi.org/10.1088/1748-9326/ac6229.

UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture). 2022. *Improving Knowledge of Central Asian Glaciers and their Resilience to Climate Change*. ATA-2022/PI/2. UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382818.

—. 2024. *Instituts et centres de catégorie 2 : Réexamens, reconductions et non-reconductions, Partie I, Centre régional de glaciologie pour l'Asie centrale (Kazakhstan)*. Conseil exécutif. Deux cent dix-neuvième session. Paris, UNESCO. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388450_fre.

—. s.d. Centre régional de glaciologie pour l'Asie centrale. Site web du Centre régional de glaciologie pour l'Asie centrale. cargc.org/en/ (en anglais).

UNESCO/IUCN (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture/Union internationale pour la conservation de la nature). 2022. *World Heritage Glaciers: Sentinels of Climate Change*. Paris/Gland, Suisse, UNESCO/IUCN. unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000383551.

Université Louis-et-Maximilien de Munich. 2018. *Revision and Update of the Danube Study*. Rapport final préparé au nom du Ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature, de la sûreté nucléaire et de la protection des consommateurs d'Allemagne, Université Louis-et-Maximilien de Munich et Commission internationale pour la protection du Danube. www.icpdr.org/sites/default/files/nodes/documents/danube_climate_adaptation_study_2018.pdf.

Valdivia Araica, A., Navarro, C. et Hernández, M. 2023. « Climate Services: A Strategy for Increasing Resilience in Guatemala's Dry Corridor ». Site web d'Alliance Biodiversity & CIAT, 3 septembre 2023. alliancebiodiversityciat.org/stories/stories/climate-services-strategy-to-increase-resilience-corridor-dry-guatemala/.

Van der Graaf, L. et Siarova, H. 2021. « Multifaceted Threats to Biodiversity in Central Asia ». Site web de Global Waste Cleaning Network, 25 septembre 2021. gwcnweb.org/2021/09/25/multifaceted-threats-to-biodiversity-in-central-asia/.

Veettil, B. K. et Kamp, U. 2019. « Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, causes, and challenges ». *Geosciences*, vol. 9, n° 5, p. 196. doi.org/10.3390/geosciences9050196.

Viviroli, D. et Weingartner, R. 2004. « The hydrological significance of mountains: From regional to global scale ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 8, n° 6, p. 1017 à 1030. doi.org/10.5194/hess-8-1017-2004.

Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. et Weingartner, R. 2007. « Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance ». *Water Resources Research*, vol. 43, n° 7. doi.org/10.1029/2006WR005653.

Viviroli, D., Kummu, M., Meybeck, M., Kallio, M. et Wada, Y. 2020. « Increasing dependence of lowland populations on mountain water resources ». *Nature Sustainability*, vol. 3, p. 917 à 928. doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9.

Wamucii, C. N., van Oel, P. R., Ligtenberg, A., Gathenya, J. M. et Teuling, A. J. 2021. « Land use and climate change effects on water yield from East African forested water towers ». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 25, n° 11, p. 5641 à 5665. doi.org/10.5194/hess-25-5641-2021.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. et Shrestha, A. B. (éds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suisse, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

WGMS (Service de surveillance mondiale des glaciers). 2024. *Fluctuations of Glaciers Database*. Zurich, Suisse, WGMS. doi.org/10.5904/wgms-fog-2024-01.

Wymann von Dach, S., Romeo, R., Vita, A., Wurzinger, M. et Kohler, T. (éds). 2014. *La Agricultura de Montaña es Agricultura Familiar: Una Contribución de las Zonas de Montaña al Año Internacional de la Agricultura Familiar 2014* [L'agriculture de montagne est une agriculture familiale : une contribution des zones de montagne à l'Année internationale de l'agriculture familiale (2014)]. Rome, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)/Centre pour le développement et l'environnement (CDE). www.fao.org/3/a-i3480s.pdf. (en espagnol).

Zandi, M. 2023. « Central Asia's Clean Energy Opportunity: Hydropower ». Site web d'Atlantic Council, 2 juin 2023. www.atlanticcouncil.org/blogs/energysource/central-asias-clean-energy-opportunity-hydropower/.

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., Sprenger, M., Tao, S., Du, W., Yang, J., Wang, F. et Meng, W. 2020. « Effects of black carbon and mineral dust on glacial melting on the Muz Taw glacier, Central Asia ». *Science of The Total Environment*, vol. 740, article 140056. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140056.

Zhang, Y., Kang, S., Sprenger, M., Cong, Z., Gao, T., Li, C., Tao, S., Li, X., Zhong, X., Xu, M., Meng, W., Neupane, B., Qin, X. et Sillanpää, M. 2018. « Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau ». *Cryosphere*, vol. 12, p. 413 à 431. doi.org/10.5194/tc-12-413-2018.

Zheng, L., Gaire, N. P. et Shi, P. 2021. « High-altitude tree growth responses to climate change across the Hindu Kush Himalaya ». *Journal of Plant Ecology*, vol. 14, n° 5, p. 829 à 842. doi.org/10.1093/jpe/rtab035.

Zoï Réseau environnemental. 2022. *Mountains of Central Asia: Supporting Biodiversity Safeguards in the Era of an Infrastructure Boom in Kyrgyzstan, Kazakhstan, and Uzbekistan*. Rapport IMPACT. Fonds de partenariat pour les écosystèmes critiques-Projet Zoï, 2021–2022. zoinet.org/wp-content/uploads/2022/06/CEPF-impact-2022-en.pdf.

Chapitre 8

Renforcement des savoirs et des capacités

UNESCO-PHI*

**Zoë Johnson, Chris DeBeer, Corinne Schuster-Wallace et
John Pomeroy¹, Sher Muhammad², Fred Wrona et Kerry Black³,
Dhiraj Pradhananga⁴ et James McPhee^{5,6}**

**Avec les contributions d'Anil Mishra et Abou Amani (UNESCO-PHI),
Stefan Uhlenbrook (OMM) et Tenzing Sherpa (ICIMOD)**

*L'UNESCO-PHI a coordonné l'élaboration du présent chapitre avec la participation de :

¹ Université de la Saskatchewan, ² ICIMOD, ³ Université de Calgary, ⁴ Université Tribhuvan,
⁵ Université du Chili et ⁶ Association internationale des sciences hydrologiques

8.1 Lacunes des données et des connaissances sur la haute montagne

• • •
*Mieux comprendre
les principes
fondamentaux de
l'hydrologie des
régions de haute
montagne est un
impératif pour
faciliter la prise
de décision*

Mieux comprendre les principes fondamentaux de l'hydrologie des régions de haute montagne est un impératif pour faciliter la prise de décision. À cet effet, des mesures politiques prioritaires sont nécessaires pour réduire les lacunes en matière de collecte de données hydrométéorologiques dans les régions montagneuses, pour concevoir des modélisations intégrées de l'interaction atmosphère-cryosphère-hydrologie-écologie-humains à partir d'éléments concrets, pour renforcer la formation permettant de rassembler différents types de savoirs (notamment les caractéristiques biophysiques, les données socio-économiques ainsi que les savoirs autochtones et locaux) et pour faciliter la participation des peuples autochtones et des communautés locales comme des femmes aux processus de constitution des savoirs.

8.1.1 Les données et les modélisations destinées à l'adaptation et à la gestion des risques

Compte tenu de la grande variabilité du climat, de la topographie, de la géologie et de la végétation des montagnes – autant de facteurs qui déterminent le mouvement de l'eau à travers les espaces naturels –, il est indispensable de mettre en place des réseaux hydrométéorologiques représentatifs et des systèmes d'information sans failles. Une forte variabilité conduit, en effet, à des risques d'erreur pour l'hydrométéorologie de montagne – les conditions dans les fonds de vallées peuvent être très différentes de celles sur les sommets malgré les faibles distances horizontales qui les séparent.

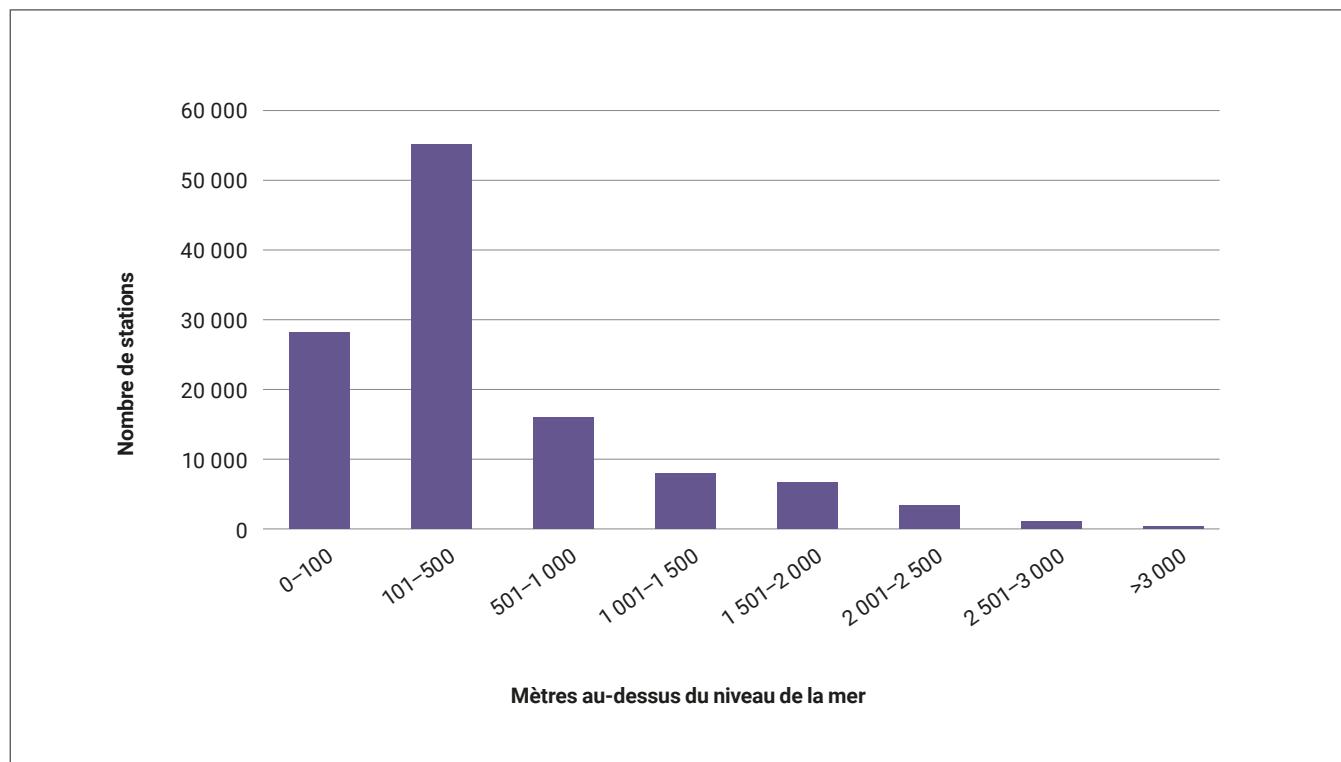
Faute d'un nombre suffisant de réseaux de surveillance et de modèles à haute résolution, il est difficile d'établir des observations et des prévisions hydrométéorologiques fiables dans les régions de haute montagne. Les régimes nivologiques et les régimes des glaces dépendent des précipitations et de la thermodynamique ; de forts gradients de variation de ces deux facteurs les affectent directement. Par conséquent, les modèles climatiques et météorologiques établis à partir d'une réduction d'échelle rudimentaire fournissent des prévisions hydrométéorologiques médiocres à des échelles de moins de quelques kilomètres. Afin d'améliorer leur précision, ils doivent pouvoir prendre en compte la convection, les processus de précipitations orographiques et les phases de précipitations (Karki et al., 2017).

Les modèles hydroglaciologiques doivent pouvoir fonctionner à des échelles aussi petites que quelques centaines de mètres et tenir compte de la complexité de la circulation des flux d'air à proximité des sols ainsi que de l'irrégularité des pentes, afin d'obtenir des schémas de redistribution de la neige et d'ablation glaciaire (Pradhananga et Pomeroy, 2022). La correction des biais et l'intégration de données peuvent permettre d'améliorer les prévisions des modèles ; aussi, les observations *in situ* s'avèrent-elles essentielles à une meilleure compréhension des interactions entre le climat et la cryosphère. Cependant, il est difficile de procéder à ces observations dans les régions montagneuses étant donné l'altitude, le caractère accidenté et l'isolement fréquents des montagnes ainsi que les risques et les menaces considérables que celles-ci présentent pour la sécurité des personnes (GIEC, 2019).

La région himalayenne de l'Hindou Kouch illustre ce défi : sur plus de 50 000 glaciers, il n'y en a que vingt-huit dont le bilan de masse est mesuré régulièrement (ICIMOD, 2023). Pour ce faire, les glaciers de référence ont été plutôt sélectionnés sur la base de critères tels que l'accessibilité, la sécurité et une géométrie simple (Østrem, 2006), ce qui ne rend pas pleinement compte de la diversité des glaciers dans un contexte régional plus large. Les observations du manteau neigeux, des conditions météorologiques et du débit des cours d'eau en montagne ont tendance à choisir également des altitudes plus basses, plus faciles d'accès.

La tendance à privilégier les basses altitudes (figure 8.1) est extrêmement problématique compte tenu de la forte influence de l'altitude sur les conditions hydrométéorologiques et place les hautes montagnes hors de toute surveillance dans de nombreuses régions du monde (Initiative pour la recherche sur la montagne, groupe de travail sur l'EDW, 2015). Les cheminements nivométriques et les coussins à neige sont d'ailleurs surtout installés dans les clairières de forêts de moyenne altitude. Même les rares situés à haute altitude se trouvent généralement sur un terrain relativement plat, de sorte qu'ils ne peuvent pas mesurer la variabilité de la redistribution de la neige et des dynamiques d'ablation en montagne (Bales et al., 2006).

Figure 8.1 Répartition mondiale des stations hydrométéorologiques par altitude, 1750-2024



Note : Ces stations ne sont pas toutes actuellement en activité. L'altitude des hautes montagnes (ces régions montagneuses où la neige et la glace jouent un rôle important dans l'approvisionnement mondial en eau douce et dans le cycle hydrologique local ou régional) change mais la plupart d'entre elles se situent à 2 000 mètres au-dessus du niveau de la mer au minimum et certaines culminent à plus de 6 000 mètres.

Source : à partir de données de NCEI NOAA (s.d.).

Le manque de surveillance de la cryosphère dans les régions montagneuses exacerbe le risque d'erreurs dans les prévisions hydroglaciologiques, aggravant du même coup le risque d'une mauvaise gestion des ressources en eau. Sans données historiques suffisantes, il est, en effet, difficile de calculer les risques et d'examiner les évolutions au cours du temps. De plus, le manque de données contraint à se satisfaire d'une résolution faible au niveau des modèles, de modélisations trop simplifiées et d'une représentation inappropriée des dynamiques hydrométéorologiques. Dans l'idéal, il faudrait que les réseaux qui permettent les mesures hydrométéorologiques, hydrométriques et de bilan de masse des glaciers soient coordonnés et élargis. Outre les obstacles en termes de financement, de logistique et d'accès, il faut surmonter pour cela une difficulté d'ordre pratique : au fur et à mesure qu'un glacier se désintègre, il devient plus difficile d'effectuer des mesures régulières, ce qui rend l'expansion des réseaux de surveillance concrètement difficile.

• • •

Au fur et à mesure qu'un glacier se désintègre, il devient plus difficile d'effectuer des mesures régulières, ce qui rend l'expansion des réseaux de surveillance concrètement difficile

Les techniques de télédétection, tels le LiDAR aéroporté et l'altimétrie satellitaire, peuvent fournir de précieuses informations. Toutefois, elles nécessitent pour leur validation et leur calibrage, des observations *in situ*. Il serait donc plus que nécessaire de pouvoir recourir à un système satellitaire capable de mesurer l'équivalent en eau de la neige (EEN) avec une haute résolution. Si les satellites actuels peuvent estimer l'épaisseur des surfaces enneigées, ils ne le peuvent pas sur des terrains complexes.

Il est donc indispensable de limiter de tels manques de données pour réduire les marges d'erreur et atténuer les risques. Les systèmes d'alerte précoce et autres interventions d'atténuation dépendent souvent fortement des appareils déployés sur le terrain. De fait, prévoir les sécheresses et les inondations, optimiser le fonctionnement des barrages et des déversoirs, déployer des filets anti-débris, des barrages secs et des abris destinés à atténuer les coulées de débris nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques qui en sont à l'origine.

Si l'on veut comprendre les changements cryosphériques et améliorer la durabilité des mesures d'atténuation et d'adaptation, il est nécessaire de renforcer les infrastructures d'observation au sein des zones de haute montagne et, surtout, de laisser les données récoltées en accès libre. Multiplier les observations implique de pouvoir mesurer, de façon régulière et exhaustive, le bilan de masse des glaciers et relever les transects d'étude de l'EEN, de surveiller les températures des sols gelés et l'humidité des sols, d'installer des stations météorologiques de haute altitude afin de suivre l'évolution de paramètres telles les précipitations solides, la température et l'épaisseur de la neige, comme d'installer des puits hydrométriques de surveillance des eaux souterraines et du niveau des lacs en haute altitude.

En outre, il faut former et déployer des techniciens de terrain capables d'effectuer des relevés glaciaires, nivologiques et hydrométriques, d'entretenir les équipements automatisés et de traiter des données pour obtenir des résultats exploitables. Dans les cas où les sciences participatives sont envisagées comme moyen d'accroître la collecte de données (section 8.3.2), il pourrait également être judicieux de mettre au point des méthodes standard homologuées, adaptées aux capacités du public, et de renforcer les capacités afin de contrôler les mécanismes de collecte de données.

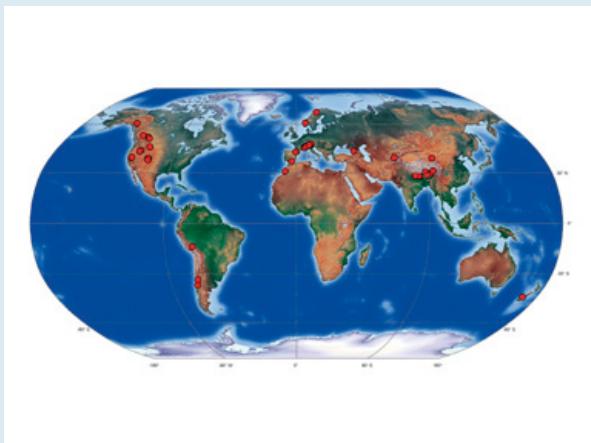
Une fois les données collectées, leur exploitation par des systèmes de gestion des données nécessite des compétences humaines techniques et financières supplémentaires (section 8.4). Disposer de données ouvertes et en libre accès, ainsi que de systèmes intégrés d'observation, de prévision et de services, pour les bassins versants de montagne peut contribuer grandement à faciliter l'emploi des informations (Adler et al., 2019) ; les politiques nationales peuvent d'ailleurs y contribuer. Pour ce faire, un financement est indispensable, même s'il ne constitue pas forcément un obstacle à l'établissement de réseaux de recherche collaborative (comme l'illustre l'encadré 8.1).

Les collaborations menées au niveau international ont été précieuses pour faciliter la recherche sur la cryosphère. Citons l'exemple de l'Association internationale des sciences cryosphériques (IACS) qui, par l'intermédiaire du Programme hydrologique intergouvernemental de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, a établi le *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms* (Glossaire du bilan de masse des glaciers et des termes connexes) (Cogley et al., 2011) afin d'aider à la normalisation de la collecte des données relatives au bilan de masse, ainsi que l'*International Classification for Seasonal Snow on the Ground* (Classification internationale de la neige saisonnière au sol) (Fierz et al., 2009). Les systèmes de classification normalisés de ce type participent largement au maintien de la cohésion des pratiques scientifiques internationales et sont essentiels à la réalisation d'analyses globales.

Encadré 8.1 International Network for Alpine Research Catchment Hydrology (INARCH)

Le réseau international de recherche sur l'hydrologie des bassins hydrographiques en milieu alpin (INARCH) est une initiative transversale du Groupe d'experts sur l'hydroclimatologie du GEWEX (Échanges planétaires d'énergie et d'eau), un projet du Programme mondial de recherche sur le climat^a. Cette initiative vise à : i) mesurer et comprendre les processus atmosphériques, hydrologiques, cryosphériques et biologiques ainsi que les processus d'interaction entre humains et eau en haute montagne, ii) améliorer les prévisions concernant ces processus en les considérant comme des systèmes couplés, iii) diagnostiquer leur vulnérabilité au changement climatique et proposer des solutions pour promouvoir la durabilité des ressources en eau dans le contexte du changement climatique (Pomeroy et al., 2015).

Composé de 56 scientifiques et de 38 bassins de recherche parfaitement équipés à travers dix-huit sur six continents, le réseau INARCH fonctionne depuis 2015 sans financement principal. Au lieu de cela, il s'appuie sur d'autres activités pour atteindre des objectifs communs à travers une philosophie d'engagement en faveur d'une mise en accès libre, déployant des efforts considérables pour compiler et publier les données collectées (Pomeroy et Marks, 2024). Son succès est dû à l'enthousiasme et aux efforts acharnés des chercheurs, dont l'engagement se manifeste à travers des ateliers organisés chaque année dans des lieux de haute montagne adjacents aux bassins de recherche, et à travers une collaboration sur des initiatives, telle une expérience de période d'observation commune (2022-2024). Des événements tels que le Sommet sur les zones de haute montagne organisé par l'Organisation météorologique mondiale ou l'Année internationale de la préservation des glaciers de l'ONU (2025) se basent sur les résultats scientifiques obtenus par l'INARCH.



Emplacement des bassins de recherche de l'INARCH dans les régions montagneuses du monde

Source : auteurs.



Exemple d'une station hydrométéorologique automatisée de l'INARCH, déployée dans le bassin de haute montagne des monts Qilian, Chine

Photographie : John Pomeroy.

^a Pour de plus amples informations, veuillez consulter inarch.usask.ca/.

• • •

Disposer de données ouvertes et en libre accès pour les bassins versants de montagne peut contribuer grandement à faciliter l'emploi des informations

De nombreuses organisations publiques ou privées participent à la recherche et à la surveillance de la cryosphère de montagne, tant au niveau national que régional et international. La création de réseaux de recherche collaboratifs peut s'avérer un outil efficace et pratique pour remédier aux lacunes en matière de connaissances et éviter les redondances dans le domaine de la recherche ou du financement des projets. Les chaînes et les bassins montagneux sont souvent transfrontaliers et sont, de ce fait, rarement considérés comme un seul ensemble à gérer. Or, les institutions n'ont souvent pas les capacités ou le mandat nécessaires pour assurer à elles seules la surveillance, la modélisation et l'évaluation d'une même région montagneuse. C'est pourquoi la mise en place de systèmes intégrés d'observation, de prévision et de services sur l'ensemble des bassins montagneux constitue un excellent moyen de combler les lacunes en matière de capacités et de ressources.

L'amélioration des modèles hydroglaciologiques peut également combler certaines lacunes en matière de données. Cette amélioration est indispensable à une meilleure prévision des changements cryosphériques et hydrologiques dans les régions montagneuses. L'accumulation et la fonte de la neige comme des glaciers saisonniers résultent de processus caractérisés par leur hétérogénéité spatiale, leur vulnérabilité aux perturbations climatiques et leur évolution rapide (voir chapitre 2), dont la plupart des modèles ne rendent pas bien compte toutefois (Pomeroy et al., 2022).

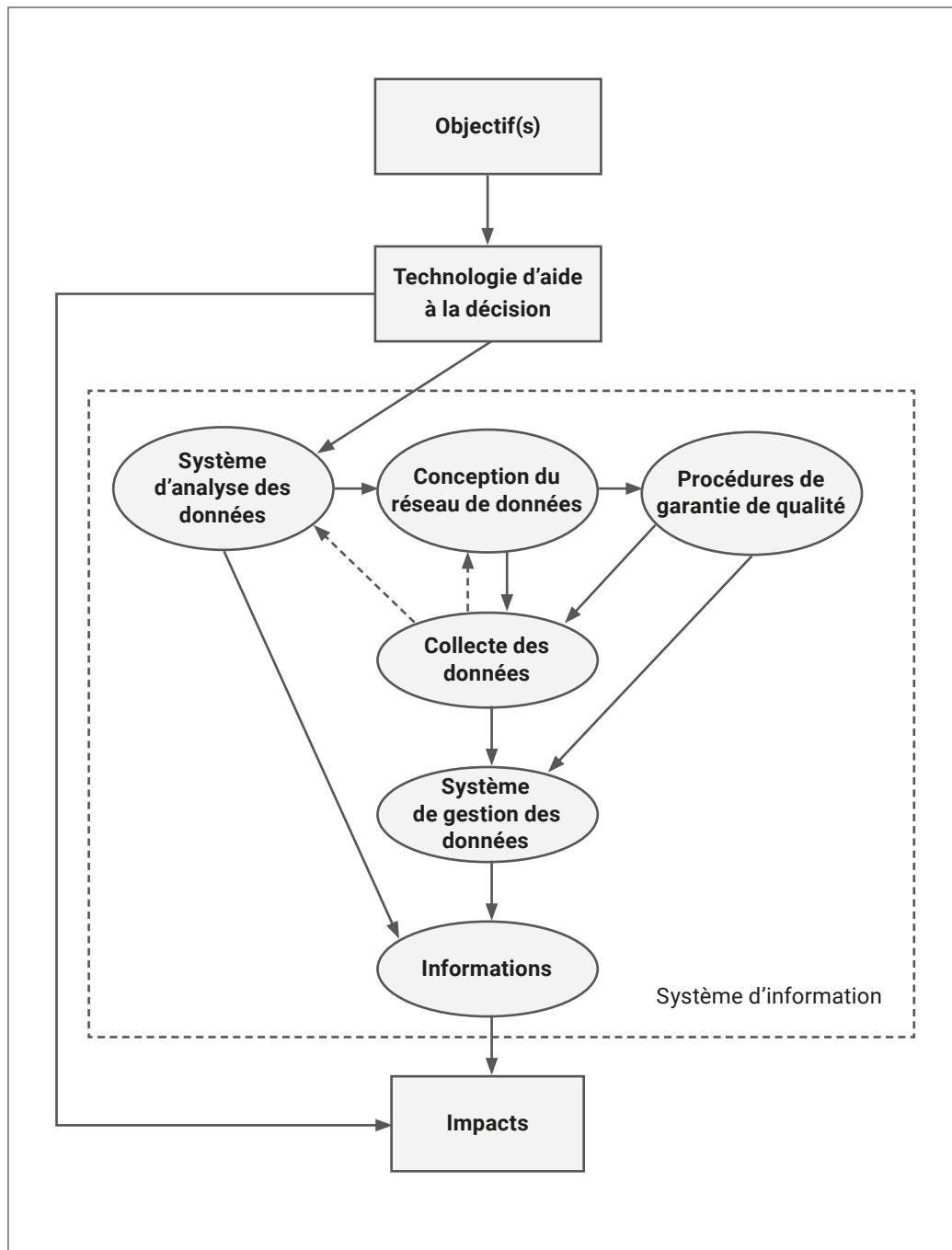
Il est impératif que les modèles prédictifs propres aux montagnes soient fondés sur les lois physiques appropriées et ne reposent pas juste sur des méthodes empiriques ou simplifiées à l'extrême (à l'instar des schémas de fonte basés sur l'indice de température par exemple). La complexité de la thermodynamique au sein de la cryosphère de montagne et la rareté des relevés disponibles pour l'étalonnage justifient cette exigence. Étant donné que les capacités de calcul augmentent au même rythme que la compréhension de l'hydrologie écologique et sociale, ces modèles hydroglaciologiques doivent être couplés avec la modélisation des systèmes écologiques et sociaux ainsi que pouvoir assimiler les données. Ceci permettra de prévoir non seulement les processus hydrologiques mais aussi leurs impacts potentiels sur les personnes, les sociétés, les économies et les écosystèmes, ainsi que de montrer les rétroactions et les changements transitoires comme de prévoir les possibilités de compromis et les conséquences involontaires des solutions d'adaptation.

La mise au point de systèmes d'information intégrés pour les montagnes est exigeante. La figure 8.2 expose les composants élémentaires d'un système d'information hydrologique, auxquelles il faudrait toutefois ajouter des données hydrométéorologiques, écologiques et socio-économiques, ne serait-ce que pour définir les objectifs initiaux (OMM, 2020). Au moment de recenser les besoins, les réseaux transdisciplinaires et transversaux peuvent être d'une grande utilité, non seulement pour les scientifiques de différentes disciplines mais aussi pour les acteurs culturels, sociaux, économiques et politiques de la société. Concevoir des voies de recherches interdisciplinaires qui répondent aux besoins en temps réel passe par le recours à un ensemble de contributions intersectorielles qui aident à identifier les acteurs clés (les communautés touchées, les spécialistes du domaine et les organisations ayant des mandats similaires par exemple), les cadres politiques et réglementaires à prendre en compte (notamment les accords de partage des eaux transfrontalières), les besoins communs pour la recherche sur un sujet ainsi que les opportunités de synergie entre différentes parties prenantes.

De l'avis général, la surcharge d'informations constitue un problème pour la recherche et l'élaboration des politiques. Afin d'y remédier, il faut envisager de réunir les personnes concernées pour définir quelles orientations, quelles ressources et quelles considérations scientifiques avoir. Les bénéfices d'une collaboration interdisciplinaire et interrégionale ne doivent pas être sous-estimés. Dans le cas des régions de haute montagne, une telle collaboration est nécessaire pour prendre en compte l'ensemble des composantes des systèmes hydriques — à savoir l'atmosphère, l'hydrologie, la glaciologie, l'écologie et les êtres humains.

Figure 8.2

Composantes d'un système d'information hydrologique



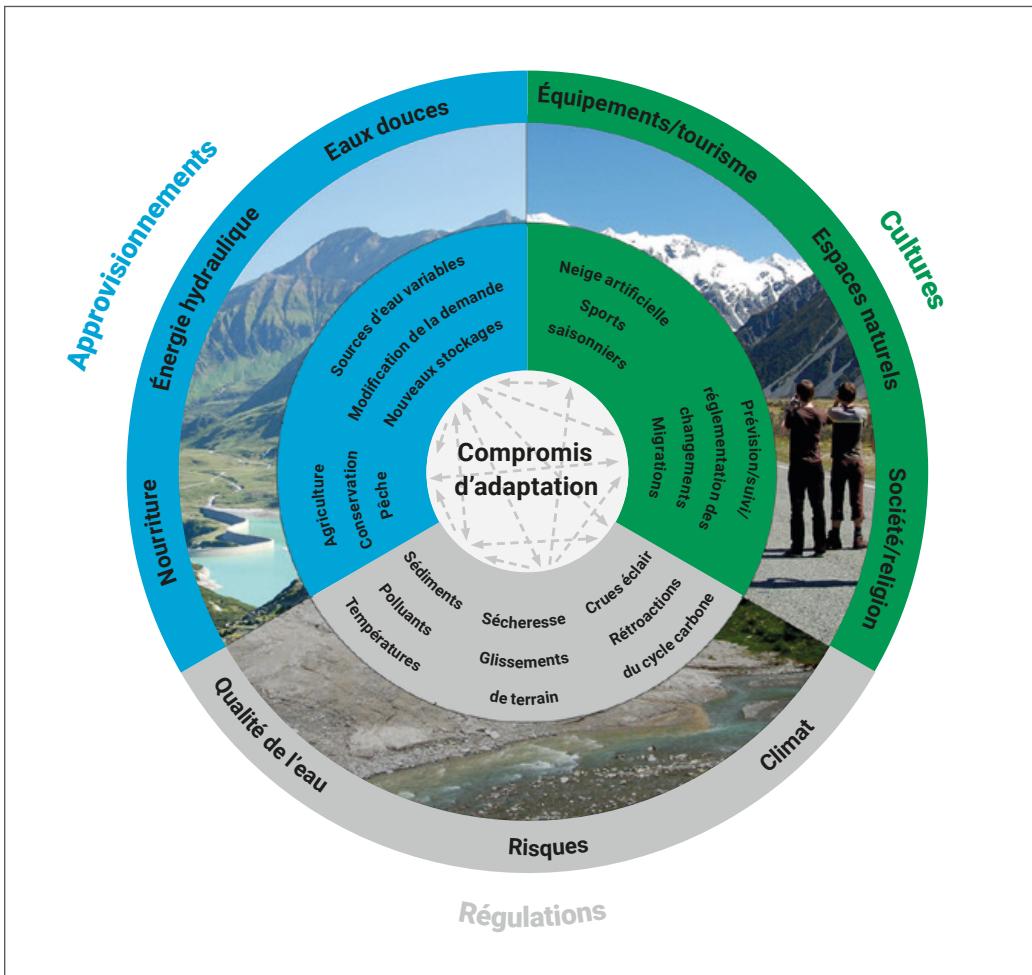
8.1.2 Les lacunes en matière de données écologiques et environnementales

On ne connaît pas encore toutes les conséquences qu'aura l'évolution des conditions d'existence de la cryosphère sur les systèmes écologiques (voir chapitre 6). Les considérations environnementales sont souvent abordées sous l'angle des services écosystémiques – soit les apports bénéfiques que les systèmes naturels fournissent gratuitement aux êtres humains et qu'il faudrait autrement fabriquer ou créer telle l'eau potable (Mengist et al., 2020). Reste que ces impacts sur les écosystèmes doivent être reconnus en tant que tels, dans la mesure où la valeur d'un écosystème ne découle pas uniquement de l'emploi qu'en font les humains. Les efforts de préparation aux bouleversements des conditions naturelles doivent tenir compte de la manière dont les êtres humains bénéficient actuellement (et peut-être sans le savoir) de divers processus écologiques de montagne, et ce afin d'orienter les politiques et d'identifier les populations les

plus vulnérables. Milner et al. (2017) ont souligné qu'il est important d'améliorer la capacité à prédire le moment, l'ampleur et la durée de la fonte de la cryosphère de montagne afin de s'en servir pour concevoir des interventions spécifiques en lien avec toute une gamme de services écosystémiques socio-économiques, notamment les services d'approvisionnement et de régulation ainsi que les services culturels (figure 8.3).

Figure 8.3

Cadre conceptuel intégrant les effets du rétrécissement de la cryosphère sur les services écosystémiques relatifs à l'approvisionnement, la régulation et les pratiques culturelles



Rares sont les projets de recherche à long terme qui portent sur les liens entre les écosystèmes terrestres, aquatiques et marins. De nouvelles études consacrées aux liens des communautés d'habitants aux écosystèmes alpins et à leur adaptation au changement climatique sont pourtant nécessaires. En priorité, ces études doivent aider à mieux appréhender l'incidence de la dégradation de la cryosphère sur la qualité des eaux, la distribution et la productivité des espèces terrestres et aquatiques, la production agricole locale, les habitats de subsistance de la faune et de la flore sauvages et leurs relations respectives avec la sécurité hydrique, alimentaire et sanitaire. Dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch par exemple, les préoccupations relatives à la productivité des plantes médicinales et à la durabilité de l'élevage comme moyen de subsistance sont très présentes d'autant plus que la vulnérabilité des milieux alpins et les possibilités d'adaptation souvent limitées au sein d'environnements aussi extrêmes provoquent parfois des migrations (ICIMOD, 2023). À cet égard, il est essentiel de travailler en coopération avec les communautés de haute montagne afin de cartographier les interdépendances et les vulnérabilités des écosystèmes.

8.2 Contributions des savoirs autochtones, sexospécifiques et locaux

• • •

Les femmes ont été traditionnellement tenues en dehors des consultations sur la gestion de l'eau

Étant donné que l'on ignore toutes les conséquences des changements de la cryosphère de montagne, le risque de franchir les seuils de durabilité écologique et socio-économique est élevé (GIEC, 2019). Des solutions d'atténuation et d'adaptation doivent être trouvées, même si elles peuvent s'avérer impossibles à mettre en œuvre. De même, les êtres humains devront revoir radicalement leurs relations à l'environnement. À titre d'exemple, la disparition des cours d'eau alimentés par la neige et les glaciers a contraint une communauté népalaise à déplacer tout son village, car l'eau nécessaire à la production agricole et à l'élevage avait disparu (Rauniyar, 2024). Dans ces conditions, il n'était pas possible de mettre en place des mesures d'adaptation et d'atténuation modérées ; la seule véritable « solution » consistait à modifier la relation des villageois à leur milieu de façon radicale. Il faut donc des évaluations pleinement intégrées des impacts du changement climatique sur les écosystèmes afin de mieux comprendre ces liens et ces vulnérabilités, ainsi que les effets à court et long terme sur la santé humaine, les tissus sociaux, les cultures et les moyens de subsistance.

Renforcer nos capacités collectives à faire face à l'évolution des conditions cryosphériques des montagnes et des conditions hydrologiques en aval suppose d'établir un dialogue et une collaboration fructueuse avec les peuples autochtones et les communautés locales, sous réserve de leur consentement préalable et éclairé, et de tirer des enseignements de la gestion des systèmes hydriques qu'ils ont développée au fil des générations. Les femmes ont été traditionnellement tenues en dehors des consultations sur la gestion de l'eau. Les peuples autochtones et les communautés locales de montagne comptent parmi les populations les plus touchées et sont néanmoins beaucoup plus largement exclues des discussions politiques et de la répartition des ressources (Latchmore et al., 2018). Bien que ces peuples autochtones et ces communautés locales représentent 6 % de la population mondiale, ils comptent pour 15 % des plus pauvres au monde et sont touchés de manière disproportionnée par les événements climatiques et les répercussions de ceux-ci sur les ressources en eau (Tsosie, 2007 ; Amnesty International, s.d. ; ONU, s.d.).

Dans les régions montagneuses, les peuples autochtones et les communautés locales ont développé depuis longtemps des relations étroites avec la terre et l'eau, qui font partie intégrante de leurs pratiques culturelles et spirituelles comme de leurs moyens de subsistance. Ces relations se caractérisent par une compréhension et un respect profonds de la nature au sein de laquelle des savoirs traditionnels ont été raffinés au fil des générations afin de gérer et de préserver les écosystèmes. Dans les Andes, par exemple, les terrasses agricoles et les systèmes de gestion de l'eau des peuples Quechua et Aymara témoignent d'une adaptation sophistiquée à des milieux de haute altitude. De même, dans l'Himalaya, les peuples autochtones tels que les Sherpa et les Ladakhi entretiennent des relations de grande proximité avec leurs terres d'origine élevées, où les pratiques spirituelles et les moyens de subsistance quotidiens sont intimement liés aux espaces naturels.

Cette interconnexion souligne le rôle essentiel que la gestion autochtone – en particulier celle des femmes qui assurent souvent la protection des ressources en eau – joue dans la préservation des écosystèmes de montagne et l'emploi durable de leurs ressources (Kelkar et Tshering, 2002 ; Cave et McKay, 2016). Ces régions possèdent généralement une importance culturelle et spirituelle qui transcende les considérations d'ordre pratique, et qui s'inscrit dans une vision holistique du cosmos où la terre et l'eau font partie intégrante de l'identité et du bien-être des personnes.

Au sein des régions montagneuses, les peuples autochtones et les communautés locales cultivent des liens intimes avec la terre qui peuvent être et devraient être un atout précieux dans l'avènement d'un développement durable. Malgré leur diversité, tous partagent souvent une conception de l'univers fondée sur l'interconnexion entre l'eau, la terre et les humains,

contrairement aux sciences occidentales qui envisagent généralement ces derniers comme des ressources, des éléments biophysiques ou des marchandises, souvent en les isolant les uns des autres. À cet égard, l'absence de vision holistique du monde au sein des sciences occidentales contredit fondamentalement les relations qui existent entre les peuples autochtones et les communautés locales, d'une part, et leur milieu naturel, de l'autre. De celles-ci, les systèmes de savoirs occidentaux peuvent tirer un enseignement, surtout compte tenu de la nécessité d'adopter des approches plus globales pour parvenir à un développement durable et équitable.

C'est cette diversité des conceptions du monde et des systèmes de valeurs que recense la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, 2022). On notera aussi que le chapitre 6 de l'édition 2024 du *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* (ONU, 2024) traite de ses enjeux pour les ressources en eau. Ces approches contrastent avec les cadres politiques occidentaux dont les cibles ou les objectifs ont souvent eu tendance à ne pas coïncider avec les besoins et les valeurs des communautés locales tel que c'est le cas lorsque la priorité est donnée à un ou deux « indicateurs représentatifs » fixés à partir de besoins économiques, énergétiques ou urbains propres aux situations en aval (Latchmore et al., 2018). Grâce au co-développement de projets de recherche (encadré 8.2), il est possible de réduire ces écarts ainsi que de s'assurer que les projets sont adaptés au contexte et portés par les peuples autochtones et les communautés locales.

Encadré 8.2 Co-développement d'une stratégie de recherche sur l'eau au service des peuples autochtones et des communautés locales

Global Water Futures est un programme de recherche couvrant l'ensemble du territoire canadien ; il a été conçu en collaboration avec les experts de l'eau et les gardiens du savoir des peuples autochtones et des communautés locales. Les projets de recherche et leurs critères d'évaluation ont été conçus de façon conjointe par des universitaires et des gardiens du savoir autochtones – une procédure qui a permis de définir des thèmes prioritaires de recherche en accord avec les valeurs propres aux peuples autochtones et aux communautés locales.

Au nombre des principaux thèmes figuraient le renforcement des capacités de surveillance et d'acquisition de données aux fins des sciences participatives, l'assistance au partage de données et aux applications numériques, l'amélioration de la compréhension des besoins et des flux environnementaux, la reconnaissance des redondances et des différences entre approches occidentales et approches autochtones en matière de sciences et de savoirs (GWF, s.d.). Sur la base des expériences présentées lors d'un atelier, un appel à projets a été lancé et les propositions élaborées avec les autochtones ont été examinées par des gardiens du savoir des peuples autochtones et des communautés locales. Les projets choisis ont répondu aux préoccupations hydriques locales et ont été présentés à la Conférence des Nations Unies de 2023 consacrée à l'examen approfondi à mi-parcours de la réalisation des objectifs de la Décennie internationale d'action sur le thème « L'eau et le développement durable » (2018-2028).

Par la suite, des représentants autochtones de l'ensemble du réseau de recherche se sont réunis pour partager leurs perspectives sur la recherche collaborative dans le domaine de l'eau. Intitulée *Everyone Together* (Tous ensemble), la réunion tenue en 2023 s'est ouverte sur l'affirmation suivante : « En tant que gardiens de nos terres, de nos ressources en eau et de nos peuples, il nous incombe de concevoir la recherche » (GWF, 2023, p. 2). À cette occasion, il a été défini un espace éthique qui place le bien-être de la communauté au premier rang de ses objectifs et où la recherche observe et respecte les protocoles locaux, où l'acquisition de savoirs est encouragée et financée de manière équitable et où la propriété intellectuelle reste au sein des communautés. Cette approche collaborative s'applique également aux milieux aquatiques de montagne.

Les peuples autochtones et les communautés locales des régions montagneuses peuvent fournir des avis éclairés et précis sur les perspectives à long terme, sur les effets des changements cryosphériques et leurs conséquences. Le savoir accumulé par l'ensemble des peuples autochtones et des communautés locales constitue une ressource aussi primordiale que méconnue, en particulier dans les régions où les recherches sont insuffisantes et les données rares.

Dans les hautes montagnes d'Asie notamment, la littérature scientifique sur les avalanches de neige et de glace fait défaut. Toutefois, les communautés locales concernées sont bien conscientes des risques liés à la cryosphère et leurs connaissances sont transmises de génération en génération (Acharya et al., 2023). Au Népal, certains murs sacrés bouddhistes se dressent en des lieux qui, autrefois, constituaient des couloirs d'avalanche – un danger particulièrement préoccupant pour les éleveurs de yaks de la région (Emerman et al., 2016 ; Acharya et al., 2023). Les murs rappellent qu'il ne faut pas traverser ces lieux ou ne pas y construire de bâtiments : ils marquent des lieux où les divinités ont exprimé leur colère sous la forme de catastrophes naturelles. Néanmoins, si ces formes de savoir ont été transmises au fil des générations, elles ne sont généralement pas prises en compte ou reconnues par les sciences occidentales.

8.3 Renforcement des capacités

•••
Les compétences techniques forment les bases indispensables que les organismes et les services en charge des décisions doivent viser à acquérir pour s'améliorer

8.3.1 Les besoins institutionnels et le renforcement des compétences

Les frontières politiques coïncident rarement avec les lignes de partage des eaux des bassins hydrographiques. La gestion des bassins fluviaux de montagne s'en trouve donc compliquée sur le plan juridictionnel et dépend de la coopération, de la communication et du partage des données entre différentes entités politiques, notamment dans des contextes transfrontaliers (entre les arrondissements municipaux, les divisions territoriales et les pays par exemple). En outre, il arrive qu'un bassin fluvial n'ait pas la même étendue spatiale que les nappes phréatiques situées en dessous ou que les étendues de glace qui le recouvrent, ce qui ajoute encore aux difficultés de gouvernance en ce qui concerne l'accès à l'eau.

La gestion des ressources en eau peut également être fragmentée au sein d'une même entité politique lorsque divers secteurs et autorités ont un rapport avec l'eau de différents types. Les ressources hydriques utilisées pour l'approvisionnement en eau potable, l'assainissement et l'hygiène peuvent ainsi tomber sous la juridiction des autorités en charge de la santé publique tandis que les ressources utilisées pour l'irrigation relèvent de la compétence des institutions responsables de l'agriculture et les ressources hydriques utilisées pour la production d'énergie hydroélectrique, de celle du développement économique, en dépit du fait que tous ces secteurs tirent peut-être ces eaux de la même source.

Gérer les ressources en eau dans toute leur diversité et leur complexité exige donc la contribution d'un large éventail de disciplines et d'acteurs. Afin de renforcer les capacités institutionnelles face aux défis décrits, il est nécessaire de mettre en place des programmes de formation transversaux, qui incluent une formation de base dans le domaine des sciences physiques et sociales en relation avec la montagne. La transdisciplinarité doit également s'accompagner d'une capacité d'intégration – soit l'aptitude à recourir à différents types et sources de données et d'avis spécifiques propres à chaque discipline et potentiellement contradictoires, et de choisir de continuer à progresser néanmoins. Prendre des décisions en dépit de priorités contradictoires et dans un contexte de pénurie – comme c'est de plus en plus souvent le cas avec l'eau – nécessite de disposer de compétences techniques et de capacité d'intégration considérables. Les compétences techniques forment les bases indispensables que les organismes et les services en charge des décisions doivent viser à acquérir pour améliorer les « compétences relationnelles » requises afin de dégager des compromis, dont les compétences en matière d'analyse, de communication et de résolution de problèmes, ainsi que les capacités de compréhension d'autres points de vue et d'argumentation des décisions.

Les capacités institutionnelles peuvent inclure le temps et les ressources nécessaires à la concertation entre personnes et l'échange de points de vue. Il ne faut pas sous-estimer les délais inhérents à ces processus, ni présumer de la volonté ou de la capacité de collaborer de chacun. Les modèles de gouvernance collaborative impliquent souvent des compromis qui, bien qu'avantageux pour la société à long terme, peuvent déplaire aux bénéficiaires actuels du statu quo. Face à des perspectives divergentes, il peut être vital de disposer d'une vision claire et cohérente de l'avenir. Des valeurs convenues entre tous peuvent constituer un cadre propice à l'obtention d'un accord entre parties (« un accès universel à l'eau douce », par exemple). Aussi laborieux qu'il puisse être, un dialogue constructif demeure le fondement de toute politique durable comme de l'élaboration de projets. Des discussions inclusives peuvent, en outre, réduire le risque de résultats imprévus, renforcer l'autonomie des groupes marginalisés et garantir la responsabilisation des décideurs.

8.3.2 Les sciences participatives et la mobilisation communautaire

La participation du public aux processus scientifiques fait partie des moyens proposés pour réduire les manques de capacités de même que pour encourager la prise de conscience et l'appréciation de la nature (UNESCO, 2021). Les sciences participatives consistent justement en la collecte et l'établissement scientifiques de savoirs par des membres du public (McDonough Mckenzie et al., 2017). Les projets de sciences participatives peuvent fournir de précieuses voies de sensibilisation du public à son environnement naturel, d'amélioration la culture scientifique et de promotion des métiers de la recherche (Rigler et al., 2022). Les sciences participatives peuvent également être un puissant moyen d'autonomisation des jeunes et des femmes, puisqu'elles leur permettent d'acquérir une expérience de travail et une position de leadership tout en répondant aux besoins de la communauté. Dans les régions comme les montagnes où les données sont rares, les sciences participatives suscitent de plus en plus d'intérêt pour pallier les limites des capacités de surveillance.

• • •

Les sciences participatives peuvent servir à renseigner et à étayer la prise de décision au niveau local

Pour que les projets de sciences participatives puissent contribuer aux recherches de la science, il faut que leur méthodologie et leurs mesures soient fiables et que l'on puisse en vérifier la cohérence, l'exactitude et la validité (McDonough Mckenzie et al., 2017). Couramment mise en œuvre, la collaboration entre des organismes de recherche et des groupes communautaires, pour laquelle les chercheurs élaborent les méthodes comme les programmes d'éducation et de formation, permet de garantir que ces conditions sont toutes remplies (Rigler et al., 2022) (encadré 8.3). Dans ce cadre, les communautés locales doivent participer à la définition de l'ampleur des projets afin de garantir que les résultats obtenus répondent à leurs besoins.

Les projets de sciences participatives se déclinent sous de nombreuses formes. Dans les régions montagneuses, le suivi de la faune (Rueda-Uribe et al., 2024), le recensement des plantes et la cartographie de la phénologie (Bison et al., 2019) ou encore l'observation du débit des cours d'eau (Etter et al., 2020 ; Scheller et al., 2024) sont autant de données ponctuelles fréquemment collectées par le public. Les approches usant d'Internet pour favoriser la participation du public, à savoir des applications conviviales qui permettent aux participants de télécharger des images et des chiffres sur une plateforme supervisée, présentent un intérêt croissant dans les régions isolées ou encore peu surveillées (Rigler et al., 2022). Toutefois, l'évaluation de la validité des données, plutôt que leurs possibilités d'emploi, reste l'objet principal des publications sur les sciences participatives (McDonough Mckenzie et al., 2017 ; Strobl et al., 2020).

Le principal obstacle qui s'oppose à un recours aux sciences participatives pour combler les manques a trait aux questions de validité. Pour ce qui est de la recherche et des applications des résultats scientifiques, il est indispensable de respecter des normes de mesure, telles celles de l'Organisation internationale de normalisation, et de pouvoir vérifier la cohérence des données. À cet égard, la publication de bases de données révisées par des pairs dans

Encadré 8.3 Le Centre de recherches sur les écosystèmes d'altitude, un legs des sciences participatives dans les Alpes

En France, le Centre de recherche sur les écosystèmes d'altitude (CREA Mont Blanc) organise des programmes de sciences participatives depuis 2004. Plus de 5 000 membres des collectivités locales ont participé à des programmes de recherche à travers huit projets de sciences participatives, qui ont permis de rassembler à eux tous plus de 40 000 données ponctuelles (notamment sur les caractéristiques phénologiques des plantes, tels les moments de bourgeonnement et de floraison ou le changement de couleur des feuilles). Une plateforme en ligne note les projets en fonction du niveau de compétence requis et transmet aux participants des instructions et des procédures à suivre. Les résultats sont téléchargés via un portail en ligne et gérés par des chercheurs. C'est ainsi que Phénoclim, projet phare du CREA en sciences participatives, génère des données sur la phénologie des plantes et a été utilisé pour étudier les effets du changement climatique sur les écosystèmes alpins (Bison et al., 2019).

le cadre de projets de sciences participatives présenterait un intérêt certain. Mais ceci impliquerait que les instituts de recherche et de surveillance exercent un certain contrôle et participent aux projets, de sorte que les sciences participatives se retrouveraient soumises aux mêmes limites de capacité et de ressources que les institutions traditionnelles.

L'apport des sciences participatives ne doit pas se limiter à la recherche et à la surveillance. Elles peuvent être, en effet, un outil précieux de sensibilisation et d'éducation de même que de mobilisation et d'initiation aux disciplines scientifiques et aux milieux montagneux au sein des communautés. Elles peuvent également servir à renseigner et à étayer la prise de décision au niveau local (Etter et al., 2023).

8.4

Le partage des informations et la communication

Une fois les données collectées et les informations élaborées, plusieurs étapes précèdent leur emploi à des fins politiques. Les informations qui sont utilisées pour la prise de décision doivent souvent être synthétisées et formulées selon des objectifs spécifiques (probabilités statistiques d'occurrence de phénomènes extrêmes, prévisions de rendement des cultures et de bénéfices économiques ou répartition et santé des espèces au fil du temps, par exemple) alors que les communications destinées au grand public peuvent au contraire se concentrer sur des idées simples, « générales », sans détails spécifiques. Les organismes (tels les organismes publics ou les organismes de financement et de recherche) doivent veiller à faire la distinction entre statistiques locales et statistiques mondiales, en particulier lorsqu'il s'agit de la cryosphère de montagne étant donné que la complexité des ressources en eau des montagnes est souvent mal décrite (voir encadré 2.2).

Produire des informations pertinentes à partir de données hydrométéorologiques brutes exige des capacités institutionnelles conséquentes. Les données ponctuelles telles que les températures, les précipitations, le débit des cours d'eau, la masse des glaciers et l'humidité du sol doivent être traitées et analysées un certain nombre de fois avant de pouvoir servir. Toutes les mesures physiques doivent notamment être téléchargées dans des répertoires de données puis corrigées et validées par des laborantins ; les ensembles de données brutes doivent être placés dans des bases de données et visualisés ou modélisés afin d'être interprétés ; la validité et l'utilité des modèles doivent être rigoureusement testées de même que le calcul des risques et la signification des tendances évolutives observées à partir des données doivent être traduits dans un langage approprié en fonction du public cible. Chacune de ces étapes nécessite des capacités spécifiques pour être réalisée, qu'il s'agisse de compétences techniques pour interpréter les données, de ressources financières pour maintenir les inventaires historiques de données, de compétences en communication pour traduire les informations en objectifs politiques et en langage clair, ou de ressources humaines pour faciliter la mise en relation à chaque étape (Schuster-Wallace et al., 2015).

• • •

Un seul type de données ou un seul angle d'analyse suffisent rarement à renseigner les décisions politiques

Un seul type de données ou un seul angle d'analyse suffisent rarement à renseigner les décisions politiques. Il s'ensuit que les organes décisionnaires doivent posséder des capacités d'intégration, soit qu'ils soient en mesure d'examiner simultanément les besoins et les contributions de plusieurs secteurs (section 8.3.1). Les organismes hydrologiques et hydrométéorologiques sont les premiers à pouvoir fournir des informations sur l'état du climat ainsi que sur l'évolution des phénomènes extrêmes et des ressources en eau afin de contribuer à la gestion des risques (OMM, 2020). Toutefois, la diversité des emplois et des besoins relatifs aux ressources en eau fait que les projets traditionnels de gestion de l'eau doivent également prendre en compte d'autres données, qui ne relèvent pas du domaine hydrologique telles que, entre autres, les dynamiques socio-économiques et écosystémiques, les structures politiques régissant les droits sur l'eau, les accords transfrontaliers ainsi que les différences d'accès selon le genre, l'âge, l'ethnie ou la classe sociale (OMM, 2009 ; Rowe et Schuster-Wallace, 2023).

Par conséquent, une prise de décision fiable requiert un large éventail de types d'informations qui doivent être présentés ou communiqués de manière à permettre aux projets intersectoriels de réagir et de s'adapter de manière appropriée aux actions des autres. Ceci peut constituer un défi pour les organismes d'évaluation qui doivent prendre en considération un ensemble diversifié d'usagers de l'eau et de formats de données, ce qui nécessite des compétences et une formation plus vastes, une expertise technique au sein du personnel ainsi qu'une révision permanente des procédures de collecte de données et de leur périmètre.

Le caractère transverse des ressources en eau et des écosystèmes de montagne peut rendre moins évidente l'attribution de responsabilités dans la gestion des données et de la fourniture de services opérationnels. Les institutions qui assurent l'interprétation des données et la prise de décision peuvent se heurter à des barrières en termes de responsabilité dans la mesure où, en l'absence de mandats ou de politiques explicites pour s'occuper des régions de haute montagne et envisager des aspects intersectoriels, les considérations écosystémiques, humaines et hydrométéorologiques risquent de se retrouver dissociées les unes des autres. Ce pourquoi l'adoption d'une gestion intégrée au sein des cadres politiques et législatifs peut s'avérer nécessaire afin de garantir une réponse holistique aux problèmes ainsi qu'une institutionnalisation de la coopération entre bassins versants au moyen d'accords transfrontaliers.

Les réseaux d'échange d'informations (voir encadré 8.1), les collaborations intersectorielles et l'engagement des parties prenantes peuvent être de puissants outils pour réduire les lacunes en matière de capacités d'intégration et obtenir des résultats durables. Le dialogue inclusif, pour sa part, crée des occasions de lever d'autres considérations. En effet, la participation locale aux processus décisionnels peut être déterminante pour la viabilité des politiques et des projets à long terme. La méfiance ou les préjugés, notamment à l'égard des institutions étrangères ou coloniales, peuvent entraver la réalisation de projets par les acteurs locaux (encadré 8.4).

Ces situations rappellent que même les approches techniques doivent être inscrites dans des contextes sociaux, politiques et culturels, et que l'efficacité des systèmes fonctionnant à partir de données dépend aussi de leur acceptation au niveau local. Sans une conception inclusive des projets — y compris par la communication et le partage des buts de la recherche et des résultats visés —, la durabilité ne peut être atteinte (Huggel et al., 2020). Comme le résume la déclaration de Douchanbé 2022 du Groupe de haut niveau sur l'amélioration des savoirs, de l'éducation et de la communication, il faut encore investir dans l'engagement communautaire, les mécanismes de communication innovants, les répertoires de solutions et de données, la recherche d'impact ainsi que le renforcement des capacités et de la sensibilisation dans tous les secteurs et toutes les institutions (Deuxième conférence de haut niveau sur la Décennie internationale d'action « L'eau et le développement durable » (2018-2028)).

Encadré 8.4 Au-delà des capacités techniques : l'importance de la confiance en la réussite d'un projet

Situé dans la cordillère Blanche des Andes péruviennes, le lac 513 s'est formé dans les années 1960 à la suite d'un retrait glaciaire. Depuis, il a provoqué plusieurs inondations du fait de ses vidanges brutales (voir section 2.2.3) (Huggel et al., 2020). En 2010, après qu'une nouvelle vidange a endommagé des infrastructures municipales et des terres agricoles en aval du lac, les autorités locales et nationales, aidées par des spécialistes et des organisations du monde entier, ont rapidement mis au point un système d'alerte précoce en vue de protéger les habitants contre de futures catastrophes. Cependant, cinq ans après la mise en place du système d'alerte précoce en 2016, un groupe d'habitants ont pris le parti de démanteler les instruments de surveillance du lac 513. Dans un contexte marqué par une forte sécheresse, une rumeur selon laquelle les équipements techniques étaient responsables de l'absence de précipitations s'était répandue, incitant les habitants, à la fois méfiants et désespérés, à passer à l'acte.

Du point de vue du renforcement des capacités, il est important de retenir de cet évènement que malgré le bon fonctionnement du système d'alerte précoce, le contexte social a joué un rôle déterminant dans son devenir global. Le cas du lac 513 n'est pas isolé ; des cas d'opposition locale à des projets gérés par des étrangers ont été observés au Pérou, dans l'Himalaya, dans les Andes et dans les Alpes. Aussi importants que soient le développement de projets et le renforcement des capacités techniques, il faut en définitive que les communautés concernées acceptent et comprennent les solutions pour que celles-ci aient un impact durable (Huggel et al., 2020).

8.5 Conclusions

Être en mesure de faire face aux conséquences des changements affectant la cryosphère de montagne suppose des observations, des savoirs et des capacités qui doivent être mobilisés dans les régions montagneuses mais aussi dans les zones en aval. Or, pour l'heure, le manque d'observations hydrométéorologiques, cryosphériques et écologiques en haute altitude compromet la validation et la représentativité des modélisations propres aux milieux de haute montagne. Il s'agit là d'un obstacle majeur à l'élaboration de solutions aux impacts des changements cryosphériques.

Dès lors, il est prioritaire que les services de surveillance disposent de capacités améliorées pour produire des données hydrométéorologiques de base et effectuer des analyses localisées afin de perfectionner les modèles. La quantité et la fiabilité des données sont fondamentales pour permettre aux meilleures décisions d'être prises. Les réseaux de partage d'informations et de données à l'échelle nationale et régionale (à l'instar des centres climatologiques régionaux qui soutiennent des programmes de surveillance à long terme et dirigent la production et la diffusion de produits et de services) comme les projets de sciences participatives constituent des moyens de combler les lacunes en matière de données (OMM, 2024).

L'intégration de stratégies d'observation, de modélisation et de services peut aider à surmonter les obstacles qui entravent le développement des bassins montagneux. Toute amélioration des capacités techniques doit s'accompagner d'investissements dans les capacités humaines. À cet égard, une éducation transdisciplinaire et une formation en communication au sein des institutions décisionnaires qui s'occupent des régions montagneuses et des zones en aval sont particulièrement importantes. Enfin, il convient également d'inclure les peuples autochtones et les communautés locales dans les processus de prise de décision et de respecter leurs différents systèmes de savoir.

Il est urgent, et nécessaire, de réagir aux changements qui affectent la cryosphère de montagne ; pour ce faire, tous les acteurs doivent œuvrer de concert, au-delà des fragmentations de la gouvernance et de la société.

Références

Acharya, A., Steiner, J. F., Walizada, K. M., Ali, S., Zakir, Z. H., Caiserman, A. et Watanabe, T. 2023. « Snow and ice avalanches in high mountain Asia—scientific, local and Indigenous knowledge ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 23, p. 2569 à 2592. doi.org/10.5194/nhess-23-2569-2023.

Adler, C., Huggel, C., Orlove, B. et Nolin, A. 2019. « Climate change in the mountain cryosphere: Impacts and responses » *Regional Environmental Change*, vol. 19, p. 1225 à 1228. doi.org/10.1007/s10113-019-01507-6.

Amnesty International. s.d. « Droit des peuples autochtones ». Site web d'Amnesty International. www.amnesty.org/fr/what-we-do/indigenous-peoples/ (consulté le 22 octobre 2024).

Bales, R. C., Molotch, N. P., Painter, T. H., Dettinger, M. D., Rice, R. et Dozier, J. 2006. « Mountain hydrology of the western United States ». *Water Resources Research*, vol. 42, n° 8. doi.org/10.1029/2005WR004387.

Bison, M., Yoccoz, N. G., Carlson, B. Z. et Delestrade, A. 2019. « Comparison of budburst phenology trends and precision among participants in a citizen science program ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 63, n° 1, p. 61 à 72. doi.org/10.1007/s00484-018-1636-x.

Cave, K. et McKay, S. 2016. « Water song: Indigenous women and water ». *Solutions*, vol. 7, n° 6, p. 64 à 73.

Cogley, J. G., Hock, R., Rasmussen, L. A., Arendt, A. A., Braithwaite, R. J., Jansson, P., Kaser, G., Möller, M., Nicholson, L. et Zemp, M. 2011. *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. Documents techniques relatifs à l'hydrologie n° 86 du PHI-VII, Contribution n° 2. de l'Association internationale des sciences cryosphériques (IACS). Paris, Programme hydrologique intergouvernemental de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO-PHI). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192525.

Deuxième Conférence de haut niveau sur la Décennie internationale d'action sur le thème « L'eau et le développement durable » (2018-2028). 2022. *Final Declaration from Dushanbe 2022 to New York 2023*. Douchanbé, 6 au 9 juin 2022. dushanbewaterprocess.org/wp-content/uploads/2022/06/2022-final-declaration-final-draft-0608-en-final-1.pdf.

Emeran, S. H., Adhikari, S., Panday, S., Bhattarai, T. N., Gautam, T., Fellows, S. A., Anderson, R. B., Adhikari, N., Karki, K. et Palmer, M. A. 2016. « The Integration of the Direct and Indirect Methods in Lichenometry for Dating Buddhist Sacred Walls in Langtang Valley, Nepal Himalaya ». *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 48, n° 1, p. 9 à 31. doi.org/10.1657/AAAR0015-026.

Etter, S., Strobl, B., Seibert, J., van Meerveld, I., Niebert, K. et Stepenuck, K. 2023. « Why do people participate in app-based environment-focused citizen science projects? ». *Frontiers in Environmental Sciences*, vol. 11, article 1105682. doi.org/10.3389/fenvs.2023.1105682.

Etter, S., Strobl, B., van Meerveld, I. et Seibert, J. 2020. « Quality and timing of crowd-based water level class observations ». *Hydrological Processes*, vol. 34, n° 22, p. 4365 à 4378. doi.org/10.1002/hyp.13864.

Fierz, C., Armstrong, R. L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D. M., Nishimura, K., Satyawali, P. K. et Sokratov, S. A. 2009. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. Documents techniques relatifs à l'hydrologie n° 83 PHI-VII, Contribution n° 1 de l'Association internationale des sciences cryosphériques (IACS). Paris, Programme hydrologique intergouvernemental de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO-PHI). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2019. *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press. doi.org/10.1017/9781009157964.

Initiative pour la recherche sur la montagne, Groupe de travail sur l'EDW. 2015. « Elevation-dependent warming in mountain regions of the world ». *Nature Climate Change*, vol. 5, p. 424 à 430. doi.org/10.1038/nclimate2563.

GWF (Global Water Futures). 2023. *Everyone Together. Global Water Futures Mistawasis Néhiyawak Water Gathering Statement*. GWF, University of Saskatchewan. gwf.usask.ca/indigenization/water-gathering-statement.php.

—. s.d. « Indigenous Research Co-Creation. Co-developing a Strategy for Indigenous Community Water Research ». Site web de GWF. University of Saskatchewan. gwf.usask.ca/km/co-creation.php#CoCreationWorkshop (consulté le 17 mai 2024).

Huggel, C., Cochachin, A., Drenkhan, F., Fluixá-Sanmartín, J., Frey, H., García Hernández, J., Jurt, C., Muñoz, R., Price, K. et Vicuña, L. 2020. « Système d'alerte précoce pour le lac glaciaire 513 au Pérou : un projet riche en enseignements ». *Bulletin de l'OMM*, vol. 69, n° 1, p. 45 à 52. library.wmo.int/records/item/46750-vol-69-1-2020?language_id=13&back=&offset=8.

ICIMOD (Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes). 2023. *Water, Ice, Society, and Ecosystems in the Hindu Kush Himalaya: An Outlook* [P. Wester, S. Chaudhary, N. Chettri, M. Jackson, A. Maharjan, S. Nepal et J. F. Steiner (eds)]. Katmandou, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1028.

IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques). 2022. *Summary for Policymakers of the Methodological Assessment Report on the Diverse Values and Valuation of Nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Allemagne, Secrétariat de l'IPBES. doi.org/10.5281/zenodo.6522392.

Karki, R., Hasson, S. U., Schickhoff, U., Scholten, T. et Böhner, J. 2017. « Rising precipitation extremes across Nepal ». *Climate*, vol. 5, n° 1, p. 4. doi.org/10.3390/cli5010004.

Kelkar, G. et Tshering, P. 2002. *Women of the mountains: Gender roles, relations, responsibilities and rights*. Actes de la conférence du Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes (ICIMOD), Paro, octobre 2002, p. 1 à 4. lib.icimod.org/record/21093.

Latchmore, T., Schuster-Wallace, C. J., Roroniakewen Longboat, D., Dickson-Anderson, S. E. et Majury, A. 2018. « Critical elements for local Indigenous water security in Canada: A narrative review ». *Journal of Water and Health*, vol. 16, n° 6, p. 893 à 903. doi.org/10.2166/wh.2018.107.

McDonough MacKenzie, C. M., Murray, G., Primack, R. et Weihrauch, D. 2017. « Lessons from citizen science: Assessing volunteer-collected plant phenology data with Mountain Watch ». *Biological Conservation*, vol. 208, p. 121 à 126. doi.org/10.1016/j.biocon.2016.07.027.

Mengist, W., Soromessa, T. et Legese, G. 2020. « Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps ». *Science of the Total Environment*, vol. 702, article 134581. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581.

Milner, A. M., Khamis, K., Battin, T. J., Brittain, J. E., Barrand, N. E., Füreder, L., Cauvy-Fraunié, S., Már Gíslason, G., Jacobsen, D., Hannah, D. M., Hodson, A. J., Hood, E., Lencioni, V., Ólafsson, J. S., Robinson, C. T., Tranter, M. et Brown, L. E. 2017. « Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 114, n° 37, p. 9770 à 9778. doi.org/10.1073/pnas.1619807114.

NCEI - NOAA (Centres nationaux d'information sur l'environnement, Administration américaine pour les océans et l'atmosphère). s.d. « Global Historical Climatology Network daily (GHCNd) [Dataset] ». Site web du NCEI - NOAA. www.ncei.noaa.gov/products/land-based-station/global-historical-climatology-network-daily (consulté le 16 mai 2024).

OMM (Organisation météorologique mondiale). 2009. *Guide des pratiques hydrologiques*. Volume II. OMM, n° 168. Genève, OMM. library.wmo.int/fr/records/item/32078-guide-des-pratiques-hydrologiques-volume-ii-gestion-des-ressources-en-eau-et-application-des-pratiques-hydrologiques?language_id=15&back=&offset=0.

—. 2020. *Guide des pratiques hydrologiques*. Volume I. OMM, n° 168. Genève, OMM. library.wmo.int/records/item/32206-guide-des-pratiques-hydrologiques-volume-i?language_id=13&back=&offset=6.

—. 2024. « Inaugural Session of the Third Pole Climate Forum (TPCF 1) and Meeting of Third Pole Regional Climate Centre Network (TPRCC-Network) Task Team ». Site web de l'OMM. community.wmo.int/en/en/activity-areas/climate/meetings/inaugural-session-third-pole-climate-forum-tpcf-1-and-meeting-third-pole-regional-climate-centre-network-tpbcc-network-task-team.

ONU (Organisation des Nations Unies). 2024. *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 – L'eau pour la prospérité et la paix*. Paris, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388949.

—. s.d. « Journée internationale des peuples autochtones 9 août ». Site web de l'ONU. www.un.org/fr/observances/indigenous-day/background (consulté le 19 juin 2024).

Østrem, G. 2006. « History of scientific studies at Peyto Glacier ». M. N. Demuth, D. S. Munro et G. J. Young (éds), *Peyto Glacier – One Century of Science*. Saskatoon, Canada, National Water Research Institute Science, Environnement Canada, p. 1 à 23.

Pomeroy, J. et Marks, D. (éds). 2024. « Hydrometeorological data from mountain and alpine research catchments ». [Numéro spécial]. *Earth System Science Data*. essd.copernicus.org/articles/special_issue871.html.

Pomeroy, J. W., Bernhardt, M. et Marks, D. 2015. « Research network to track alpine water ». *Nature*, vol. 521, p. 32 à 32. doi.org/10.1038/521032c.

Pomeroy, J. W., Brown, T., Fang, X., Shook, K. R., Pradhananga, D., Armstrong, R., Harder, P., Marsh, C., Costa, D., Krogh, S. A., Aubry-Wake, C., Annand, H., Lawford, P., He, Z., Kompanizare, M., Lopez, J. I. et Moreno, J. L. 2022. « The cold regions hydrological modelling platform for hydrological diagnosis and prediction based on process understanding ». *Journal of Hydrology*, vol. 615, article 128711. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128711.

Pradhananga, D. et Pomeroy, J. W. 2022. « Diagnosing changes in glacier hydrology from physical principles using a hydrological model with snow redistribution, sublimation, firnification and energy balance ablation algorithms ». *Journal of Hydrology*, vol. 608, article 127545. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127545.

Rauniyar, T. 2024. « The drought that forced a Himalayan village in Nepal to relocate ». BBC News, 23 mai 2024. www.bbc.com/future/article/20240522-the-drought-that-forced-a-himalayan-village-in-nepal-to-relocate.

Rigler, G., Dokou, Z., Khadim, F. K., Sinshaw, B. G., Eshete, D. G., Aseres, M., Amera, W., Zhou, W., Wang, X., Moges, M., Azage, M., Li, B., Holzer, E., Tilahun, S., Bagtzoglou, A. et Anagnostou, E. 2022. « Citizen science and the Sustainable Development Goals: Building social and technical capacity through data collection in the upper Blue Nile Basin, Ethiopia ». *Sustainability*, vol. 14, n° 6, article 3647. doi.org/10.3390/su14063647.

Rowe, A. M. et Schuster-Wallace, C. 2023. « Implementing EDI across a large formal research network: Contributing to equitable and sustainable water solutions for a changing climate ». *Geoforum*, vol. 147, article 103881. doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103881.

Rueda-Uribe, C., Herrera-Alsina, L., Lancaster, L. T., Capellini, I., Layton, K. K. et Travis, J. M. 2024. « Citizen science data reveal altitudinal movement and seasonal ecosystem use by hummingbirds in the Andes Mountains ». *Ecography*, vol. 2024, n° 3, article e06735. doi.org/10.1111/ecog.06735.

Scheller, M., van Meerveld, I., Sauquet, E., Vis, M. et Seibert, J. 2024. « Are temporary stream observations useful for calibrating a lumped hydrological model? ». *Journal of Hydrology*, vol. 632, article 130686. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130686.

Schuster-Wallace, C. J., Sandford, R., Dickin, S. K., Vijay, M., Laycock, K. et Adeel, Z. 2015. *Water in the World We Want: Catalysing National Water-Related Sustainable Development*. Hamilton, Canada, Institut pour l'eau, l'environnement et la santé de l'Université des Nations Unies (UNU-INWEH). reliefweb.int/report/world/water-world-we-want-catalysing-national-water-related-sustainable-development.

Strobl, B., Etter, S., van Meerveld, I. et Seibert, J. 2020. « Accuracy of crowdsourced streamflow and stream level class estimates ». *Hydrological Sciences Journal, Special Issue: Hydrological Data: Opportunities and Barriers*, vol. 65, n° 5. doi.org/10.1080/02626667.2019.1578966.

Tsosie, R. A. 2007. « Indigenous People and environmental justice: The impact of climate change ». *University of Colorado Law Review*, vol. 78, p. 1625.

UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture). 2021. *Recommandation de l'UNESCO sur une science ouverte*. Paris, UNESCO. doi.org/10.54677/LTRF8541.

Chapitre 9

Gouvernance et financement

WWAP de l'UNESCO

Matthew England et Richard Connor

Avec la contribution d'Ansgar Fellendorf (PNUE)

• • •

Le rôle de la gouvernance de l'eau dans les régions montagneuses n'a pas fait l'objet d'autant d'attention que la gouvernance de l'eau dans les terres de plus basse altitude

La gouvernance de l'eau désigne la gestion des ressources en eau, y compris les politiques, les institutions et les processus de prise de décision déterminant leur emploi et leur protection²⁰. En montagne, elle a pris des formes uniques au fil du temps et dépend du contexte de chaque chaîne montagneuse. Le rôle de la gouvernance de l'eau dans les régions montagneuses n'a pas fait l'objet d'autant d'attention que la gouvernance de l'eau dans les terres de plus basse altitude à propos de laquelle de nombreux travaux ont été réalisés, notamment dans le cadre de la GIRE (Molden et al., 2013).

Il convient d'accorder une attention particulière à la gouvernance de l'eau en montagne alors que la concurrence pour l'accès à cette ressource ne cesse de croître, que les dynamiques climatiques changent et ont des répercussions, et que de nouveaux défis se présentent à l'échelle mondiale. La pression grandissante exercée par le développement socio-économique sur les ressources en eau, combinée aux variations de disponibilité saisonnière allant de la saison chaude à la saison froide, ne fait qu'augmenter la complexité de sa gouvernance. La réponse aux défis complexes qui se posent à la gouvernance et aux systèmes socio-économiques requiert une compréhension et une collaboration plus approfondies à différents niveaux et échelles – dans les montagnes et également en aval. Dans le discours et les pratiques actuels, la gouvernance de l'eau en montagne se résume souvent à la « protection des sources » et à la gestion des bassins hydrographiques, ainsi qu'à savoir comment elle affectera les usagers installés en aval sur les terres de plus basse altitude et leur sera profitable.

Le présent chapitre passe en revue, dans un premier temps, la gouvernance de l'eau en montagne à partir des accords internationaux et des cadres politiques existants. Il examine ensuite les conventions régionales pour la coopération transfrontière sur les bassins hydrographiques, étant donné que de nombreux cours d'eau prennent leur source en montagne et traversent les frontières nationales. Un tour d'horizon des politiques et de leur mise en œuvre aux niveaux nationaux est ensuite fourni, en rapport avec les intérêts de développement et la gestion des eaux par les communautés. Enfin, le chapitre se termine par un compte-rendu des aspects financiers de la gouvernance de l'eau en montagne.

9.1 Gouvernance des eaux de montagne au niveau international

Les politiques internationales fournissent un cadre propice à la gouvernance de l'eau comme à l'adaptation au changement climatique dans les montagnes, tout en traitant des problématiques de développement durable. De fait, les traités et les conventions constituent des catalyseurs pertinents qui favorisent la coopération et l'action à l'échelle des régions montagneuses (Dinar et al., 2016). Toutefois, on dispose de peu de données, à l'échelle mondiale, qui permettent de déterminer, de manière systématique, leur degré d'efficacité à relever les défis spécifiques induits par l'évolution de la cryosphère de montagne (Hock et al., 2019).

Au fil du temps, l'élaboration de cadres politiques internationaux relatifs aux montagnes a abouti à plusieurs accords. L'importance des montagnes a d'abord été officiellement reconnue au niveau international lors de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de 1992. Le chapitre 13 du programme d'Action 21 a été consacré au développement durable des montagnes (CNUED, 1992). Outre l'importance des écosystèmes de montagne aux niveaux mondial, régional et

²⁰ Le rapport spécial *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* définit la gouvernance comme un « effort destiné à établir, réaffirmer ou modifier les institutions officielles et informelles à tous les niveaux en vue de négocier les relations, de résoudre les conflits sociaux et d'obtenir des avantages mutuels » (GIEC, 2019, p. 687).

• • •

Les politiques internationales fournissent un cadre propice à la gouvernance de l'eau comme à l'adaptation au changement climatique dans les montagnes

local, ce chapitre met l'accent sur la protection des ressources naturelles, notamment les ressources en eau, sur l'amélioration des moyens de subsistance des collectivités locales et des peuples autochtones, ainsi que sur la promotion de la coopération internationale pour la valorisation des montagnes. En entérinant le plan d'action correspondant au chapitre 13 du programme d'Action 21 au plus haut niveau politique, dont plus de 178 États Membres de l'Organisation des Nations Unies, la communauté internationale a, pour la première fois, exprimé officiellement son inquiétude commune et établi un plan d'action collectif (Romeo et al., 2022).

Dix ans plus tard, l'ONU a proclamé l'année 2002, Année internationale de la montagne. La Conférence des Nations Unies sur le développement durable a reconnu, dans son document final intitulé *L'avenir que nous voulons*, que « [I]es écosystèmes montagneux jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement en ressources en eau pour une grande partie de la population mondiale » (Assemblée générale des Nations Unies, 2012, p. 46).

En 2008, l'Assemblée générale des Nations Unies a adopté la résolution 62/196 sur le développement durable dans les régions montagneuses. Cette résolution reconnaît que les montagnes donnent des indications sur le changement climatique avec le recul des glaciers et les variations du ruissellement saisonnier qui pourraient avoir des conséquences pour les grandes sources d'eau douce. Les défis posés par le développement durable des montagnes y ont été identifiés, notamment la demande croissante en eau (en particulier en aval) et les conséquences de l'érosion, de la déforestation, de la dégradation des bassins hydrographiques et des catastrophes naturelles. Cette résolution souligne l'importance des montagnes en tant que sources d'eau pour les zones de plaines souvent densément peuplées (Assemblée générale des Nations Unies, 2008).

Plus récemment, l'Assemblée générale des Nations Unies a proclamé l'année 2022, Année internationale du développement durable dans les régions montagneuses, sur proposition du Gouvernement du Kirghizistan, et avec le soutien de quatre-vingt quatorze pays.

Les eaux de montagne figurent également parmi les axes d'autres cadres internationaux tels que l'Accord de Paris (CCNUCC, 2015) et le Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030) (Assemblée générale des Nations Unies, 2015a). Ces cadres soulignent l'importance du contrôle et du suivi des objectifs et des indicateurs pertinents en matière de gouvernance de l'eau.

La Convention sur la protection et l'utilisation des cours d'eau transfrontières et des lacs internationaux (Convention sur l'eau) fournit, au niveau mondial, une plateforme juridique et intergouvernementale unique pour la coopération transfrontière en matière de gestion de l'eau et peut être un instrument précieux pour la gestion durable et la conservation des montagnes. Elle engage les pays à élaborer et à mettre en œuvre des accords transfrontières, de même qu'à établir des organes conjoints de coopération de ce type qui couvrent également les régions montagneuses, et leur apporte une aide pour ce faire. En outre, elle garantit une approche source-mer, dans le cadre de laquelle le bassin fait l'objet d'une gestion d'ensemble qui va de l'amont à l'aval.

Les objectifs de développement durable (ODD) de l'Organisation des Nations Unies (Assemblée générale des Nations Unies, 2015b) peuvent offrir des directives supplémentaires pour renforcer la gouvernance de l'eau alors qu'évolue la cryosphère, étant donné que le contrôle et le suivi des cibles et indicateurs clés relatifs à l'eau, ainsi que leur interaction avec d'autres ODD, incluent l'approvisionnement en eau comme une condition préalable au développement. Toutefois, peu d'éléments ont permis d'évaluer leur efficacité à partir de preuves concrètes (Hock et al., 2019).

9.2 Gouvernance régionale des eaux de montagne

La plupart des grands fleuves prennent leur source dans des régions montagneuses avant de traverser plusieurs frontières nationales. Une gouvernance transfrontière de l'eau, basée sur une approche à l'échelle des bassins qui tienne compte des eaux de montagne, peut être bénéfique aux pays riverains. En effet, la coopération régionale entre pays, y compris les initiatives de gouvernance au niveau des bassins hydrographiques, est un mécanisme essentiel pour faire progresser l'adaptation au changement climatique dans les montagnes (Molden et al., 2013 ; Mishra et al., 2019). Les traités ou les accords peuvent permettre de renforcer la coopération entre pays riverains grâce à une surveillance accrue et une plus grande collecte de données en vue de remédier au manque chronique de données dans les régions montagneuses, d'aider à identifier et à combler les fossés en matière de capacités techniques humaines et institutionnelles, d'établir des comités de gestion conjoints, de promouvoir le partage d'informations comme de promouvoir et de favoriser le dialogue et la diplomatie entre pays riverains (Adler et al., 2022).

Les recherches consacrées aux initiatives régionales de gouvernance dans les régions montagneuses ont permis d'identifier certains éléments pertinents pour les eaux de montagne (encadré 9.1). Bien que les accords initiaux conclus entre pays riverains s'avèrent souvent insuffisants ou trop généraux pour permettre une coopération durable, ils posent néanmoins les bases pour l'élaboration de traités supplémentaires qui peuvent conduire à une coopération plus accrue²¹ (des traités plus spécifiques et qui ciblent un problème particulier dans le bassin, par exemple). L'augmentation de la variabilité hydrologique du fait du changement climatique pousse les pays à adopter un comportement plus coopératif, notamment au niveau opérationnel (la gestion de l'eau à partir d'infrastructures partagées entre pays riverains, par exemple). Il arrive toutefois que cette volonté de coopération soit minée par l'augmentation de la variabilité hydrologique au-delà d'un certain seuil (Dinar et al., 2016). Toutefois, cette coopération se heurte à des divergences d'intérêts nationaux dans le cadre des accords sur les eaux transfrontalières ainsi qu'à l'inefficacité des institutions à assurer une coordination dans le contexte local (Kliot et al., 2001 ; Hayat et al., 2022).

Encadré 9.1 Composition des initiatives régionales de gouvernance dans les régions montagneuses

Les principales caractéristiques des initiatives régionales de gouvernance des régions montagneuses sont les suivantes :

- Territorialité : portée géographique de l'initiative en termes de juridictions des membres et de zone d'application des accords.
- Forme institutionnelle : degré de justification requis, ou dispositif informel, et moyens de mise en œuvre.
- Intégration sectorielle : nombre de secteurs et mécanismes institutionnels les reliant.
- Coordination verticale : diversité et caractère de l'implication des acteurs publics à différents niveaux ainsi que l'acceptation et les procédures de la subsidiarité.
- Participation de la société civile : degré et nature de l'implication des organisations non gouvernementales et du secteur privé.
- Interface science-politique : nature des mécanismes institutionnels encadrant les échanges bilatéraux entre décideurs politiques et scientifiques.
- Modalités de financement : évaluation des sources de financement et des dépenses, dans la mesure où des informations sont disponibles.
- Adaptation écosystémique liée au changement climatique, y compris pour l'eau.

Source : extrait de Balsiger et al. (2020, p. 5 à 6).

²¹ Le droit international coutumier et les principes généraux régissent également l'utilisation des eaux transfrontalières, ce qui peut faciliter la coopération.

• • •

La coopération se heurte à des divergences d'intérêts nationaux dans le cadre des accords sur les eaux transfrontalières ainsi qu'à l'inefficacité des institutions à assurer une coordination dans le contexte local

Les trois accords régionaux suivants constituent des exemples de coopération transfrontière sur les ressources en eau dans les régions montagneuses.

La chaîne de montagnes de la **région himalayenne de l'Hindou Kouch** s'étend sur plus de 3 500 km et est partagée par huit pays (Afghanistan, Bangladesh, Bhoutan, Chine, Inde, Myanmar, Népal et Pakistan). Y prennent leur source dix grands bassins hydrographiques. La région compte 240 millions d'habitants et l'on estime que 1,65 milliard de personnes installées en aval dépendent des eaux de montagne pour l'eau potable et l'assainissement, l'alimentation (irrigation), l'énergie (hydroélectricité) et les services écosystémiques (habitats, flux environnementaux et valeurs culturelles). La fonte des glaciers et des neiges est un apport important au débit des cours d'eau, leur volume relatif augmentant avec l'altitude et la proximité des glaciers et des réserves de neige. Les eaux souterraines provenant de sources situées dans les collines de moyenne altitude de l'Hindou Kouch contribuent également de manière importante au débit de base des cours d'eau (Wester et al., 2019).

Dans cette région, une coopération transfrontière efficace destinée à améliorer la gouvernance de l'eau fait actuellement défaut. Les initiatives intergouvernementales se sont concentrées sur les intérêts politiques et économiques (au niveau national) plutôt que sur le bien-être social et écologique à l'échelle régionale. La gouvernance de l'eau se caractérise par des systèmes hybrides formels et informels, la prédominance étant donnée aux structures informelles au niveau local et aux institutions publiques formelles aux niveaux national et régional. Une synergie et un soutien mutuel entre les institutions publiques et structures informelles chargées de la gestion de l'eau font souvent défaut. En outre, les inégalités de genre s'avèrent fréquentes au sein de ces institutions, ce qui se traduit par un accès inégal à l'eau. Au niveau régional, c'est le manque de confiance qui entrave l'échange des données et l'amélioration de la coopération pour le partage de l'eau. L'échange de données et d'informations est pourtant une étape fondamentale pour la réduction des risques de catastrophes naturelles transfrontalières, telles les vidanges brutales de lacs glaciaires (voir section 2.2.3) et les crues. La méfiance entre riverains limite le partage des avantages apportés par l'eau et les services connexes tels que l'irrigation, l'énergie et la navigation (Wester et al., 2019).

Des éléments essentiels à l'amélioration de la gouvernance de l'eau et de la coopération transfrontière ont été identifiés pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch (voir section 7.4). Il s'agit notamment d'établir des cadres formels comme base de coopération régionale, de reconnaître l'importance des plateformes d'échange des savoirs en vue de faciliter la coopération régionale comme la nécessité de mettre en place un mécanisme approprié de gestion des conflits et de répartition équitable des bénéfices (Wester et al., 2019).

En dépit du fait que la coopération transfrontière (locale) entre bassins hydrographiques au sein de la région himalayenne de l'Hindou Kouch ait une longue histoire, la gouvernance à l'échelle de la chaîne de montagnes est un fait récent (encadré 9.2). Le langage de la coopération transfrontière est altéré par des agendas et des intérêts politiques et territoriaux. Dans ce contexte, peut-être est-il plus intéressant d'aborder la coopération entre pays riverains dans le cadre d'une coopération régionale autour des chaînes de montagnes.

Encadré 9.2 L'Équipe spéciale de haut niveau pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch

Afin de renforcer progressivement la gouvernance à l'échelle de la chaîne de montagnes, les huit pays de cette région ont créé l'équipe spéciale de haut niveau pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch afin de donner suite aux recommandations antérieures de l'Appel à l'action (ICIMOD, 2020). Sa création a été approuvée lors du premier Sommet ministériel sur les montagnes himalayennes de l'Hindou Kouch, qui s'est tenu en 2020. Lors d'une réunion, des ministres des huit pays ont signé une déclaration d'une importance historique, par laquelle il a été convenu de renforcer la coopération régionale au sein de la région. À présent, des hauts fonctionnaires collaborent au sein de l'équipe spéciale de haut niveau pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch afin d'effectuer un suivi des progrès réalisés dans le cadre de l'Appel à l'action et d'évaluer le potentiel de mécanismes institutionnels pour renforcer la coopération régionale.

L'Appel à l'action pour la région himalayenne de l'Hindou Kouch fournit une feuille de route pour l'avenir, articulée autour de six mesures :

1. Coopérer à tous les niveaux dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch en vue d'un bénéfice durable et mutuel.
2. Reconnaître et privilégier le caractère unique des populations montagnardes de la région.
3. Prendre des mesures climatiques concertées à tous les niveaux afin de limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C d'ici à 2100.
4. Prendre des mesures accélérées en vue d'atteindre les objectifs de développement durable et neuf priorités relatives aux montagnes.
5. Renforcer la résilience des écosystèmes, mettre un terme à la perte de biodiversité et à la dégradation des sols.
6. Partager des données et des informations au niveau régional, et mettre en place une coopération sur le plan scientifique et des savoirs.

La coopération et la gouvernance des eaux transfrontalières sont abordées dans l'Appel à l'action.

Notamment, l'action 5 demande aux pays de la région de mettre en œuvre des programmes consacrés aux écosystèmes d'eau douce, y compris la cryosphère et les bassins hydrographiques, de manière à maintenir la qualité et le débit des eaux dans les rivières de la région himalayenne de l'Hindou Kouch par l'intermédiaire de l'adoption d'une gestion des bassins hydrographiques à l'échelle transfrontière. Il revient aux pays de la région d'intégrer les écosystèmes d'eau douce et aquatiques au sein des politiques et stratégies nationales et territoriales. Cela passe par l'inclusion de l'évaluation des impacts écologiques et sociaux dans les projets de développement économique tels que l'énergie hydroélectrique, les barrages et les routes. Il y est aussi préconisé d'encourager le versement de paiements pour les services écosystémiques aux personnes qui protègent les zones de captage des centrales hydroélectriques, ainsi que pour l'approvisionnement en eau potable et le tourisme.

L'action 6 appelle, quant à elle, à la collecte et au partage de données relatives aux variables climatiques, notamment pour l'eau, l'énergie et la sécurité alimentaire, la biodiversité et la pauvreté en montagne. Elle promeut activement la coopération en matière de partage de données ouvertes pour les biens et les services publics entre pays riverains.

Sources : adapté d'ICIMOD (2020) et Adaptation at Altitude (s.d.).

• • •

La gestion des eaux de montagne s'effectue principalement à l'échelle des pays au moyen de lois, de politiques et de stratégies nationales

La **Convention alpine** (voir section 7.2.1) est un traité international de coopération transfrontière concernant les Alpes et signé en 1991. Il est doté d'un Secrétariat permanent et d'un organe directeur (Romeo et al., 2022). Elle a été signée par l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Italie, le Liechtenstein, Monaco, la Slovénie, la Suisse et l'Union européenne. Il s'agit de l'un des deux seuls traités juridiquement contraignants relatifs aux montagnes avec la Convention des Carpates (Balsiger et al., 2020). La Convention alpine recense douze domaines d'action régis par huit protocoles juridiquement contraignants²². Néanmoins, il n'existe pas de protocole relatif à l'eau, la gestion de cette ressource ayant un caractère transversale (Balsiger, 2007 ; Lackner et Psenner, 2007). La gestion des ressources en eau relève par conséquent de la compétence juridique des gouvernements nationaux. Le Secrétariat de la Convention alpine assiste les pays membres par l'élaboration de directives sur des sujets tels que les répercussions du changement climatique sur les ressources en eau dans les Alpes (Secrétariat permanent de la Convention alpine, 2014). Cette convention a permis d'accélérer les mesures d'adaptation en harmonisant les réponses politiques des pays riverains ainsi qu'en facilitant la création de partenariats et de mises en réseau (Balsiger, 2007).

La **Convention des Carpates** a été établie en 2003 aux fins de la protection de la deuxième plus grande chaîne de montagnes d'Europe (voir section 7.2.2). La Hongrie, la Pologne, la Roumanie, la Serbie, la Slovaquie, la Tchéquie et l'Ukraine en sont membres (Secrétariat de la Convention des Carpates, 2020). Il s'agit du seul mécanisme de gouvernance à plusieurs niveaux pour l'ensemble de la zone des Carpates à fournir un cadre de coopération et de coordination des politiques multisectorielles, une plateforme de mise au point de stratégies communes de développement durable et un forum pour le dialogue entre tous les acteurs concernés (Climate-ADAPT, s.d.). Le Programme des Nations Unies pour l'environnement héberge le Secrétariat de la Convention des Carpates, dont le groupe de travail déploie une vision de l'adaptation au changement climatique sur le long terme. L'article 6 de la convention porte sur la gestion durable et intégrée des bassins hydrographiques. Il existe aussi un groupe de travail dont le mandat inclut la vulnérabilité de l'eau et des écosystèmes au changement climatique comme l'adaptation.

9.3 Gouvernances nationale et locale des eaux de montagne

La gestion des eaux de montagne s'effectue principalement à l'échelle des pays au moyen de lois, de politiques et de stratégies nationales. La formulation et la mise en œuvre des politiques s'inscrivent dans le contexte politique et économique d'un pays. Dans certains cas, les politiques nationales relatives à l'eau, à l'agriculture, à l'industrie et à l'énergie sont élaborées de manière à favoriser les régions de faible altitude au sein des bassins hydrographiques, afin notamment de bénéficier à des zones plus peuplées. Il est rare qu'elles tiennent pleinement compte des problématiques sectorielles propres aux montagnes relativement à l'eau ; au contraire, elles ont tendance à envisager les montagnes uniquement comme des sources d'approvisionnement pour les usagers en aval.

Les recommandations offertes par les cadres internationaux et les accords transfrontières fournissent des orientations pour élaborer des politiques et des stratégies nationales. De façon manière universelle, plusieurs réflexions et approches sont recommandées dans l'optique d'améliorer la gouvernance des eaux de montagne. Il s'agit notamment de renforcer la collaboration et d'intensifier le suivi, y compris la collecte et le partage de données, de s'appuyer sur les savoirs autochtones et locaux,

²² Aménagement du territoire et développement durable, agriculture de montagne, protection de la nature et entretien des espaces naturels, forêts de montagne, tourisme, énergie, conservation du sol et transports.

• • •

Les gouvernements nationaux constituent d'importantes sources d'investissement, généralement par le biais d'instruments sectoriels telles l'agriculture et les politiques de l'eau

de promouvoir l'égalité des genres, de donner la priorité au développement inclusif et aux approches d'adaptation au changement climatique pour réduire la pauvreté en montagne et d'établir des plateformes/mécanismes de résolution des conflits et des accords de partage des bénéfices entre riverains (Adler et al., 2022).

L'expérience de la région himalayenne de l'Hindou Kouch montre qu'une amélioration de la mise en œuvre des politiques à l'échelle nationale sera possible seulement si les autorités nationales reconnaissent le caractère multisectoriel et multi-niveaux de la gouvernance de l'eau. Cette mise en œuvre dépend, en effet, de l'engagement de différentes parties prenantes, notamment celle des communautés autochtones et des femmes, mais également de la prise en compte des savoirs locaux. Il s'avère nécessaire de faciliter les interactions en amont et en aval afin d'améliorer la gouvernance au niveau territorial. Au niveau national, il est recommandé de renforcer la participation des collectivités et la décentralisation, de promouvoir le développement au travers de différentes parties prenantes et de s'attaquer aux problèmes de mise en œuvre. Les gouvernements doivent mettre en place des cadres réglementaires et des dispositifs institutionnels locaux pour faciliter la réussite des initiatives destinées à renforcer les actions collectives et à inspirer des partenariats entre les structures communautaires et le gouvernement (Wester et al., 2019).

Les régions montagneuses pourraient bénéficier concrètement de la prioritisation d'approches de développement et d'adaptation plus inclusives en matière de gouvernance. Cela passe notamment par une prise en considération respectueuse des divers savoirs autochtones et des systèmes de connaissances propres aux régions montagneuses ainsi que par une lutte soutenue contre les causes profondes de la vulnérabilité. Cela nécessiterait donc une meilleure coordination et des activités de suivi, des mécanismes de prise de décision plus inclusifs, notamment pour les petits exploitants agricoles, les femmes, les structures autochtones et les groupes de jeunes ainsi qu'une augmentation substantielle des financements alloués au développement durable des montagnes. Ces aspects fondamentaux de la gouvernance constituent des remparts importants contre les difficultés auxquelles sont confrontées les régions montagneuses, notamment en ce qui concerne les ressources en eau.

Les lois sur la protection des glaciers

Seuls quelques pays disposent de lois vouées à la protection ou à la préservation des glaciers. Votée en 2010 et confirmée par la Cour suprême argentine en 2018, la loi argentine pour la protection des glaciers nationaux (voir section 7.3.1) est destinée à interdire l'exploitation minière dans les zones de glaciers et de pergélisol (Taillant, 2019). En 2024, le Tadjikistan a adopté une loi posant les bases juridiques, économiques et logistiques d'une protection des glaciers en tant que biens naturels et sources stratégiques de ressources en eau (République du Tadjikistan, 2024). D'autres pays comme le Chili (voir encadré 5.1) et le Kirghizistan ont proposé des lois similaires faisant des glaciers, des zones protégées (Iribarren Anacona et al., 2018).

Les glaciers étant des systèmes dynamiques, ces cadres juridiques peuvent s'avérer complexes et difficiles à adopter et à appliquer. Ils peuvent inclure des considérations relatives à l'approvisionnement en eau et à la qualité de celle-ci ainsi que des mesures préventives ou d'urgence, destinées à faire face aux risques glaciaires, tout en équilibrant les différents points de vue et besoins afin d'éviter les conflits sociaux, écologiques et économiques.

9.4 Valorisation et financement

Bien que certains des biens et services fournis par les milieux de montagne – tels le bois, l'hydroélectricité et les ressources minières – puissent avoir une valeur économique mesurable (coûts d'extraction par rapport aux bénéfices, par exemple), les avantages et les valeurs environnementaux s'avèrent beaucoup plus difficiles à monétiser – l'eau propre, l'air et la biodiversité en constituent des exemples classiques. De plus, les ressources des montagnes sont elles-mêmes intrinsèquement complexes et interdépendantes, ce qui veut dire qu'elles constituent un ensemble commun plutôt qu'un produit séparé.

L'examen des pertes et des dommages causés par les aléas naturels fournit également une idée de la valeur globale des régions montagneuses (encadré 9.3).

Encadré 9.3 Les pertes financières dues aux aléas naturels en montagne

Entre 1985 et 2014, c'est dans la région himalayenne de l'Hindou Kouch (45 milliards de dollars EU), suivie par les Alpes européennes (7 milliards de dollars EU) et les Andes (3 milliards de dollars EU), que les coûts des dommages économiques signalés dans les régions montagneuses à la suite d'inondations et de mouvements terrestres (pas seulement ceux liés à la cryosphère) se sont avérés les plus élevés (Stäubli et al., 2018). Au Pérou, le coût du rétrécissement des glaciers a été estimé à 740 millions de dollars EU par an pour le secteur de l'énergie, avec une réduction globale de 11 à 15 % de la production électrique (Vergara et al., 2007). De même, la Suisse, qui a recours à l'hydroélectricité pour produire plus de la moitié de son énergie, devrait perdre environ 21 % de ses apports annuels au cours de la période 2031-2050 par rapport à la période 1991-2010 ; on s'attend également à une réduction supplémentaire du potentiel hydroélectrique en raison du rétrécissement de la cryosphère (Gaudard et al., 2013).

Il arrive souvent que les données relatives aux dommages financiers ne comprennent que le coût des infrastructures détruites et n'évaluent pas la valeur des terres agricoles (Muhammad et al., 2021), ni les dommages à long terme causés aux infrastructures routières, sanitaires ou éducatives (Shrestha et al., 2023). Combinés au changement des approvisionnements en eau de fonte, les risques accrus de catastrophes naturelles liées aux aléas climatiques ont touché de plein fouet les populations autochtones et les communautés montagnardes qui dépendent des glaciers et de la fonte des neiges pour assurer leur subsistance. Ces communautés subissent souvent des pertes et des dommages non économiques ou immatériels tels que la perte du patrimoine culturel et des espaces naturels sacrés, ce qui menace aussi leur capacité d'adaptation (Adler et al., 2022).

Source : adapté de PNUE (2023).

La disponibilité de ressources financières

Les gouvernements nationaux constituent d'importantes sources d'investissement, généralement par le biais d'instruments sectoriels telles l'agriculture et les politiques de l'eau. Des financements peuvent aussi être obtenus par l'intermédiaire de différents programmes de coopération territoriale comportant une « composante montagne ». Dans les pays en développement, les donateurs bilatéraux et multilatéraux peuvent, eux aussi, fournir un financement supplémentaire (Balsiger et al., 2020).

L'adaptation au changement climatique dans les montagnes repose sur un financement approprié ainsi que sur la participation et la contribution du secteur privé (Mishra et al., 2019 ; PNUE, 2023). En dépit des fonds considérables qui pourraient être investis dans le développement durable des régions montagneuses, l'accès aux principaux programmes d'aide a été relativement réduit. Malgré son intérêt, cette

solution non négligeable reste donc insuffisamment appliquée (McDowell et al., 2020). C'est dire, de façon plus précise, que des fonds internationaux, régionaux, nationaux et locaux, aux visées innovantes et aux montants raisonnables, pourraient être mobilisés afin d'aider à la planification et au développement des infrastructures dans les secteurs de l'eau, de l'agriculture et de l'énergie. Un meilleur emploi des aides et financements disponibles pourrait contribuer à alléger le fardeau des collectivités et des pays de montagne, pour lesquels il apparaît essentiel de renforcer la capacité et l'aptitude des acteurs à identifier puis à mobiliser des ressources financières. Certains facteurs susceptibles d'encourager des investissements dans les régions montagneuses ont été identifiés (encadré 9.4) (Wymann von Dach et al., 2016).

Encadré 9.4 Facteurs pouvant encourager les investissements financiers dans les régions montagneuses

- La mise en place d'un contexte national favorable. Ce qui passe par la mise en place de politiques nationales pour les régions montagneuses, liées à la politique générale de développement national, qui permettent d'encourager et de coordonner les investissements publics.
- La sécurité constitue une condition préalable à l'investissement. Nous parlons de la stabilité politique comme de la présence de dirigeants dignes de confiance, d'un État de droit et d'un accès fiable aux ressources notamment foncières, au crédit, à l'épargne et à l'assurance, pour les investisseurs locaux, nationaux et internationaux.
- Les investissements doivent de préférence être décentralisés et destinés en priorité aux petites et moyennes entreprises. Les raisons en sont l'habitat dispersé, la topographie accidentée et la faible densité de population dans de nombreuses régions montagneuses en comparaison des plaines. Les villes de petite et de moyenne taille offrent des possibilités de mise en œuvre de ces principes d'investissement.
- La décentralisation politique et fiscale est importante pour tenir compte de la grande diversité, souvent sur de courtes distances, des environnements naturels, des sociétés et des cultures. Elle implique le transfert de pouvoirs, de compétences et de financements à des organes territoriaux et locaux.
- La collaboration transfrontière crée des opportunités d'investissement, car les régions montagneuses chevauchent souvent les frontières nationales. Cela peut notamment prendre la forme d'investissements dans les infrastructures de transit, les infrastructures de gestion des eaux transfrontalières et les stratégies de réduction des risques de catastrophe naturelle. Les organismes de gestion des bassins hydrographiques transfrontaliers et les agences de gestion des bassins pourraient faciliter ou accueillir la planification conjointe des investissements des États riverains, ce qui permettrait d'harmoniser des mécanismes de financement mixte innovants et efficaces.
- Le recours aux savoirs et à la recherche est essentiel. Les savoirs locaux et scientifiques, ainsi que le développement des capacités, revêtent une importance particulière si l'on veut adapter les investissements à des conditions écologiques et culturelles spécifiques. Le suivi des résultats des investissements permet de montrer les avantages pour les collectivités et les écosystèmes de montagne ainsi que pour les investisseurs, et donc d'attirer davantage d'investissements dans le développement durable des montagnes à l'avenir.

Source : adapté de Wymann von Dach et al. (2016, p. 67).

• • •

Le développement des régions de haute altitude occasionne généralement plus de dépenses et de difficultés que celui des territoires de plus basse altitude

Le développement des régions de haute altitude occasionne généralement plus de dépenses et de difficultés que celui des territoires de plus basse altitude en raison du relief accidenté et du manque d'accès, des limites imposées aux économies d'échelle, de l'éloignement des ports maritimes et des centres d'affaire ainsi que du faible développement des secteurs de l'industrie et des services. Plus la zone est isolée et en altitude, plus les coûts liés au transport, à l'infrastructure, aux biens et aux services augmentent. C'est là un aspect dont il faut tenir compte dans les politiques et les financements, et qui justifie la mise en place de politiques et de programmes spécifiques aux montagnes dans le cadre des plans de développement nationaux et mondiaux.

Bien que l'on connaisse et reconnaisse l'importance des services écosystémiques fournis par les montagnes (voir chapitre 6), les populations montagnardes contribuant au maintien de ces ressources sont rarement indemnisées pour leurs efforts. Les politiques et les investissements s'avéreront plus durables s'ils favorisent le partage équitable des bénéfices tirés de l'exploitation des eaux de montagne avec les populations montagnardes. Les eaux de montagne offrent une vaste opportunité de développer des mécanismes d'investissement et de compensation pour sauvegarder les écosystèmes montagneux et améliorer les moyens de subsistance des personnes qui y habitent. Ces mécanismes pourraient notamment prendre la forme de financements participatifs destinés à la gestion des bassins hydrographiques et d'un partage direct des bénéfices (des flux de revenus issus de la production hydroélectrique avec les personnes vivant à proximité des centrales électriques, par exemple).

Il arrive fréquemment de constater une asymétrie des relations de production et des termes commerciaux entre les régions de montagne et les régions de plaine, les plaines étant généralement favorisées, tandis que les industries extractives telles que l'exploitation minière, la production hydroélectrique et l'exploitation forestière apportent généralement peu de bénéfices aux populations des montagnes. En se concentrant sur des plans d'investissement conjoints couvrant plusieurs secteurs – tels l'énergie, l'agriculture, la pêche, l'eau potable, les transports et les services écosystémiques – il est possible d'obtenir des profils risque/rendement intéressants. Les programmes d'investissement conjoints intégrés permettent également de réduire les conflits parce qu'ils permettent d'établir un terrain d'entente commun sur les intérêts sectoriels, politiques et générationnels à partir de la disponibilité actuelle et future des ressources en eau, ce qui offre, en fin de compte, des opportunités intéressantes de réduction des risques pour les investisseurs (FENU, 2021).

Références

Adaptation at Altitude. s.d. « Hindu Kush Himalaya ». Site web d'Adaptation at Altitude. mountains-connect.org/mountain-range-hindu-kush-himalaya/.

Adler, C., Wester, P., Bhatt, I., Huggel, C., Insarov, G. E., Morecroft, M. D., Muccione, V. et Prakash, A. 2022. « Mountains ». H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem et B. Rama (éds), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution du Groupe de travail II au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 2273 à 2318. doi.org/10.1017/9781009325844.022.

Assemblée générale des Nations Unies. 2008. Développement durable dans les régions montagneuses. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 19 décembre 2007. Soixante-deuxième session, A/RES/62/196. documents.un.org/doc/undoc/gen/n07/475/54/pdf/n0747554.pdf.

—. 2012. L'avenir que nous voulons. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 27 juillet 2012. Soixante-sixième session, A/RES/66/288. documents.un.org/doc/undoc/gen/n11/476/11/pdf/n1147611.pdf.

—. 2015a. Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030). Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 3 juin 2015. Soixante-neuvième session, A/RES/69/283. documents.un.org/doc/undoc/gen/n15/167/17/pdf/n1516717.pdf.

—. 2015b. Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 25 septembre 2015. Soixante-dixième session, A/RES/70/1. documents.un.org/doc/undoc/gen/n15/291/90/pdf/n1529190.pdf.

Balsiger, J. 2007. « Regionalism Reconsidered: The Alpine Convention as a Model of Earth System Governance ». Article présenté à la conférence d'Amsterdam sur les dimensions humaines du changement environnemental mondial, 24-26 mai 2007.

Balsiger, J., Dupuits, E. et Scolobig, A. 2020. *International Experience in Transboundary Mountain Governance: Insights for Andean Cooperation*. Genève, Institut de gouvernance de l'environnement et développement territorial, Université de Genève. archive-ouverte.unige.ch/unige:145756.

CCNUCC (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques). 2015. *Accord de Paris*. ONU. unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf.

Climate-ADAPT. s.d. « Carpathian Convention ». Site web de Climate-ADAPT. climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/organisations/carpathian-convention.

CNUED (Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement). 1992. Managing fragile ecosystems: Sustainable mountain development. *Agenda 21*. CNUED, Rio de Janeiro, Brésil. sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf.

Dinar, S., Katz, D., De Stefano, L. et Blankespoor, B. 2016. *Climate Change and Water Variability: Do Water Treaties Contribute to River Basin Resilience?* Document de travail consacré à la recherche sur les politiques n° 7855. Washington, Banque mondiale. documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/209901476193940390/climate-change-and-water-variability-do-water-treaties-contribute-to-river-basin-resilience.

FENU (Fonds d'équipement des Nations Unies). 2021. *Blue Peace Financing Initiative: Solving Local Water and Sanitation Challenges Through Cooperation and Sustainable Financing*. FENU. www.uncdf.org/article/7569/blue-peace-financing-initiative-solving-local-water-and-sanitation-challenges-through-cooperation-and-sustainable-financing.

Gaudard, L., Gilli, M. et Romerio, F. 2013. « Climate change impacts on hydropower management ». *Water Resources Management*, vol. 27, p. 5143 à 5156. doi.org/10.1007/s11269-013-0458-1.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2019. Annex I: Glossary [Weyer, N. M. (éd.)]. H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 677 à 702. doi.org/10.1017/9781009157964.015.

Hayat, S., Gupta, J., Vegelin, C. et Jamali, H. 2022. « A review of hydro-hegemony and transboundary water governance ». *Water Policy*, vol. 24, n° 11, p. 1723 à 1740. doi.org/10.2166/wp.2022.256.

Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. et Steltzer, H. 2019. « High mountain areas » H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama et N. M. Weyer (éds), *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Royaume-Uni/New York, Cambridge University Press, p. 131 à 202. doi.org/10.1017/9781009157964.004.

ICIMOD (Centre international de mise en valeur intégrée des montagnes). 2020. *The HKH Call to Action to Sustain Mountain Environments and Improve Livelihoods in the Hindu Kush Himalaya*. Katmandou, ICIMOD. doi.org/10.53055/ICIMOD.1.

Iribarren Anacona, P., Kinney, J., Schaefer, M., Harrison, S., Wilson, R., Segovia, A., Mazzorana, B., Guerra, F., Fariñas, D., Reynolds, J. M. et Glasser, N. F. 2018. « Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change ». *Ambio*, vol. 47, p. 835 à 845 doi.org/10.1007/s13280-018-1043-x.

Kliot, N., Shmueli, D. et Shamir, U. 2001. « Institutions for management of transboundary water resources: Their nature, characteristics and shortcomings ». *Water Policy*, vol. 3, n° 3, p. 229 à 255. doi.org/10.1016/S1366-7017(01)00008-3.

Lackner, R. et Psenner, R. 2007. *The water balance of the Alps: What do we need to protect the water resources of the Alps?* Actes de la conférence tenue à l'Université d'Innsbruck, les 28 et 29 septembre 2006. Innsbruck University Press. doi.org/10.26530/OAPEN_503830.

McDowell, G., Harris, L., Koppes, M., Price, M. F., Chan, K. M. A. et Lama, D. G. 2020. « From needs to actions: Prospects for planned adaptations in high mountain communities ». *Climatic Change*, vol. 163, p. 953 à 972. doi.org/10.1007/s10584-020-02920-1.

Mishra, A., Appadurai, A. N., Choudhury, D., Regmi, B. R., Kelkar, U., Alam, M., Chaudhary, P., Mu, S. S., Ahmed, A. U., Lotia, H., Fu, C., Namgyel, T. et Sharma, U. 2019. « Adaptation to climate change in the Hindu Kush Himalaya: Stronger action urgently needed ». P. Wester, A. Mishra et A. B. Shrestha (éds), *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suisse, Springer, p. 457 à 490. doi.org/10.1007/978-3-319-92288-1_13.

Molden, D., Hurni, H., Zimmermann, A. et Wymann von Dach, S. 2013. « Focus issue: Water governance in mountains ». *Mountain Research and Development*, vol. 33, n° 3, p. 193 à 194. doi.org/10.1659/mrd.3303.

Muhammad, S., Li, J., Steiner, J. F., Shrestha, F., Shah, G. M., Berthier, E., Guo, L., Wu, L.-X. et Tian, L. 2021. « A holistic view of Shisper Glacier surge and outburst floods: From physical processes to downstream impacts ». *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 12, n° 1, p. 2755 à 2775. doi.org/10.1080/19475705.2021.1975833.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). 2023. Un manque de financement et de préparation – L'insuffisance des investissements et de la planification en matière d'adaptation au climat expose le monde au danger. Rapport 2023 sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière d'adaptation aux changements climatiques. Nairobi, PNUE. doi.org/10.59117/20.500.11822/43796.

République du Tadjikistan. 2024. Закон Республики Таджикистан о защите ледников [Loi de la République du Tadjikistan relative à la protection des glaciers]. № 2026. Dushanbe. faolex.fao.org/docs/pdf/taj224299.pdf (en russe).

Romeo, R., Manuelli, S. et Abear, S. 2022. « The International Year of Sustainable Mountain Development 2022: An opportunity to promote action for mountains ». *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 6, n° 933080. doi.org/10.3389/fsufs.2022.933080.

Secrétariat de la Convention des Carpates. 2020. *Long-term Vision 2030 Towards Combating Climate Change in the Carpathians*. Groupe de travail sur le changement climatique de la Convention des Carpates. Sixième réunion de la conférence des parties à la Convention-cadre sur la protection et le développement durable des Carpates. www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/03%20Meetings%20and%20Events/COP/2020_COP6_Online/official%20documents/CC%20COP6%20DOC10_Long_Term_Vision_2030_FINAL%20DRAFT.pdf.

Secrétariat permanent de la Convention alpine. 2014. Convention cadre : Principes directeurs pour une vie durable dans les Alpes. Site web de la Convention alpine. www.alpconv.org/fr/page-daccueil/convention/convention-cadre/.

Shrestha, F., Steiner, J. F., Shrestha, R., Dhungel, Y., Joshi, S. P., Inglis, S., Ashraf, A., Wali, S., Walizada, K. M. et Zhang, T. 2023. « A comprehensive and version-controlled database of glacial lake outburst floods in High Mountain Asia ». *Earth System Science Data*, vol. 15, n° 9, p. 3941 à 3961. doi.org/10.5194/essd-15-3941-2023.

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., Zambrano, E. et Zimmermann, M. 2018. « Analysis of weather-and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases ». S. Mal, R. B. Singh et C. Huggel (éds), *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction: Towards Sustainable Development Goals*. Sustainable Development Goals Series. Cham, Suisse, Springer, p. 17 à 41. doi.org/10.1007/978-3-319-56469-2_2.

Taillant, J. D. 2019. « Argentine Supreme Court Upholds Glacier Law ». Site web du Centre pour les droits humains et l'environnement (CHRE). center-hre.org/argentine-supreme-court-upholds-glacier-law/.

Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A. et Haeussling, S. 2007. « Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes ». *EOS*, vol. 88, n° 25, p. 261 à 264. doi.org/10.1029/2007EO250001.

Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. et Shrestha, A. B. (éds). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Suisse, Springer. lib.icimod.org/record/34383.

Wymann von Dach, S., Bachmann, F., Borsdorf, A., Kohler, T., Jurek, M. et Sharma, E. 2016. *Investing in Sustainable Mountain Development: Opportunities, Resources and Benefits*. Collection Sustainable Mountain Development. Bern, Centre pour le développement et l'environnement (CDE)/Université de Berne/Bern Open Publishing (BOP). www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/04%20Publications%20-%20Press%20-%20Gallery/Documents%20and%20Publications/CDE_2016_Investing%20in%20Sustainable%20Mountain%20Development.pdf.

Chapitre 10

Conclusions

WWAP de l'UNESCO
Richard Connor

Les montagnes, notre affaire à tous

Les montagnes, qui couvrent près d'un quart de la surface terrestre mondiale, fournissent 55 % à 60 % des flux annuels d'eau douce de la planète. Véritables châteaux d'eau de la planète, elles constituent une source d'approvisionnement indispensable à la survie de milliards de personnes – dans les montagnes comme en aval. Elles fournissent également d'autres ressources naturelles, biens et services essentiels et souvent uniques, employés partout dans le monde. Mais en dépit de leur importance capitale, les régions montagneuses ne reçoivent pas généralement autant d'attention que les autres parties du globe et restent largement absentes des programmes d'action mondiaux. Ayant une place à la jonction des crises de l'eau, du climat et de la biodiversité, leur rôle critique dans le développement durable ne peut pourtant pas être ignoré.

Au sein des régions montagneuses, les principales activités économiques incluent l'agriculture, l'élevage, la sylviculture, le tourisme, l'exploitation minière, le commerce transfrontalier et la production d'énergie. Ces régions produisent des marchandises à forte valeur, tels les plantes médicinales, le bois et autres produits forestiers, un bétail particulier et des spécialités agricoles régionales. Elles constituent aussi des zones sensibles en termes de biodiversité agricole, une grande partie du patrimoine génétique mondial servant à l'agriculture comme des plantes médicinales se trouvant dans les zones de montagnes.

• • •

*Les régions
montagneuses
ne reçoivent pas
généralement
autant d'attention
que les autres
parties du globe et
restent largement
absentes des
programmes
d'action mondiaux*

En raison du changement climatique, les régions montagneuses se réchauffent rapidement, au point que leur rôle dans le cycle de l'eau s'en trouve modifié de façons inédites et, dans bien des cas, imprévisibles. Si l'accélération de la fonte des glaciers alpins a fait l'objet d'une attention considérable et parfaitement légitime, il faut souligner que c'est le manteau neigeux saisonnier, et non les glaciers, qui constitue, dans la plupart des régions de haute montagne, la principale source de ruissellement. On constate souvent un manque de compréhension et une mauvaise caractérisation de l'importance relative et des contributions respectives de la fonte des neiges, de la glace et des sols gelés envers la disponibilité et la qualité des ressources en eau en aval (voir chapitre 2).

Les conséquences du changement climatique, notamment la hausse des températures, le recul des glaciers, le dégel du pergélisol et la modification des régimes de précipitations, peuvent exacerber les risques de catastrophe naturelle tels que les glissements de terrain, les inondations et les coulées de débris. Sous l'effet du recul des glaciers, le nombre de lacs glaciaires et leur superficie totale ont augmenté de manière significative depuis les années 1990. Davantage de ces lacs verront le jour au cours des prochaines décennies, ce qui entraînera l'apparition de nouvelles zones sensibles, propices à des inondations potentiellement dangereuses, causées par des vidanges brutales de lac glaciaire.

Les pratiques d'exploitation non durables dans l'emploi des terres, à commencer par la déforestation et l'expansion urbaine rapide ainsi que la pollution due aux activités humaines, telle l'exploitation minière, menacent l'équilibre hydrologique de ces régions fragiles, leurs écosystèmes ainsi que les vies qu'elles abritent et les moyens de subsistance des personnes, et ce de la source des cours d'eau jusqu'à la mer.

Plus d'un milliard de personnes (environ 15 % de la population mondiale) vivent dans des régions montagneuses, pour la plupart (90 %) dans des pays en développement. Environ deux tiers des personnes habitant dans ces régions vivent dans des villes. Or, les terrains accidentés, l'exposition accrue aux risques naturels et les coûts plus élevés en montagne font qu'il est plus difficile de mettre en place et d'entretenir des systèmes de distribution d'eau et des réseaux d'assainissement, des stations d'épuration ou encore des systèmes de protection des sources dans ces zones où l'urbanisation progresse rapidement (voir chapitre 4).

Dans les pays en développement, pas moins de la moitié des habitants des zones rurales de montagne sont exposés à l'insécurité alimentaire, les femmes et les enfants étant les plus menacés (voir chapitre 3). Parmi les éléments contribuant à l'insécurité alimentaire figurent

• • •

Les traités et les conventions constituent des catalyseurs pertinents qui favorisent la coopération et l'action à l'échelle des régions montagneuses

l'éloignement et l'inaccessibilité (la distance depuis les routes et les marchés alimentaires, par exemple), les saisons de culture plus courtes, les grandes variations saisonnières des réserves d'eau pour l'agriculture et les faibles niveaux de mécanisation.

Les industries consommatrices d'eau se sont développées dans les régions montagneuses car l'eau et d'autres ressources y sont relativement abondantes (voir chapitre 5). Outre de servir à la production d'énergie (hydraulique par exemple), l'eau sert également à l'extraction et au traitement des minerais, à la production de bois et au développement du tourisme. Dans les régions montagneuses isolées, il peut être difficile d'appliquer une réglementation appropriée, ce qui diminue le contrôle des prélèvements d'eau et des rejets, y compris de polluants industriels susceptibles de compromettre la qualité de l'eau utilisée par les habitants des montagnes comme par ceux qui se trouvent en aval.

Les montagnes fournissent des services écosystémiques relativement à l'eau qui comprennent le stockage et la régulation des inondations ainsi que la réduction des risques d'érosion et de glissements de terrain. En outre, elles se composent d'une large diversité de zones écologiques et possèdent souvent une biodiversité endémique plus riche que les basses terres, notamment de grandes variétés génétiques au sein des cultures agricoles et des espèces animales (voir chapitre 6). L'évolution de la plupart des écosystèmes de montagne va dépendre des changements qui se produiront sur le plan hydrologique bien plus que des effets directs des changements de température.

Actions : aller de l'avant

L'eau joue un rôle fondamental dans l'**adaptation au changement climatique** des montagnes. La plupart des efforts d'adaptation connus ayant lieu dans les régions montagneuses portent sur les aspects hydriques (variabilité des précipitations et des phénomènes extrêmes, notamment sécheresses, inondations et disponibilité de l'eau, par exemple) et comprennent des mesures telles que la mise en place de **systèmes d'alerte précoce**. L'eau entre aussi en ligne de compte dans l'adaptation d'autres secteurs, parmi lesquels l'agriculture, la réduction des risques de catastrophe naturelle, le tourisme et les loisirs.

Étant donné qu'environ 30 % des forêts de la planète sont situées dans des régions montagneuses, ces dernières ont un fort potentiel en matière de stockage et de piégeage du carbone. Toutefois, à l'exception de la protection des forêts et du reboisement aux fins de stockage du carbone, les possibilités d'**atténuation du changement climatique**, notamment à travers l'emploi et le changement d'affectation des terres, y sont souvent limitées.

Les efforts de **conservation de l'eau** dans les régions montagneuses, qui incluent la restauration et la protection des zones particulièrement vulnérables (telles les zones humides), la gestion des bassins versants et l'utilisation judicieuse des ressources en eau, forment des mesures d'adaptation fiables et sans grands aléas cachés. Des initiatives visant à « faire pousser de la glace » en hiver par la fabrication de neige et les stupas de glace dans le but d'augmenter les flux d'eau de fonte au printemps ont également été lancées, rencontrant un certain succès à petite échelle, localement.

La **réduction des risques liés à l'eau** dans les régions montagneuses exige que l'on s'attaque aux causes profondes de la vulnérabilité, notamment la pauvreté, la marginalisation et les inégalités entre les genres. À cet égard, reconnaître et respecter les nombreuses cultures et les divers **savoirs autochtones et locaux** qui existent dans ces régions, et qui fondent les capacités d'adaptation des communautés, peut créer des bases solides sur lesquelles appuyer des stratégies intégrées d'adaptation et d'atténuation spécifiques à chaque site. Des structures et des processus de gouvernance inclusifs, comprenant l'élaboration et la mise en œuvre de politiques et de mesures, peuvent contribuer à renforcer ces capacités.

• • •

Plus la zone est isolée et en altitude, plus les coûts liés au transport, à l'infrastructure, aux biens et aux services augmentent

La pression grandissante exercée par le développement socio-économique sur les ressources en eau, combinée aux variations de disponibilité saisonnière allant de la saison chaude à la saison froide, ne fait qu'augmenter la complexité de sa **gouvernance**. L'amélioration de la gestion des bassins hydrographiques requiert plus que de nouvelles infrastructures anthropiques.

Les **cadres politiques internationaux** fournissent un cadre propice à la gouvernance de l'eau comme à l'adaptation au changement climatique dans les montagnes, tout en traitant des problématiques de développement durable. De fait, les traités et les conventions constituent des catalyseurs pertinents qui favorisent la coopération et l'action à l'échelle des régions montagneuses.

En 2008, l'Assemblée générale des Nations Unies a reconnu l'importance des montagnes en tant que cours supérieurs et sources d'eau pour les régions en aval, souvent densément peuplées, en adoptant la résolution 62/196 sur le développement durable dans les régions montagneuses. Dans ces régions, la gouvernance de l'eau se résume le plus souvent à la « protection des sources » et à la gestion des bassins hydrographiques au bénéfice des usagers en aval. Il est donc dans l'intérêt de tous d'assurer la gouvernance et la gestion (comme le financement) des régions montagneuses de manière durable.

La plupart des grands fleuves prenant leur source dans des régions montagneuses avant de traverser plusieurs frontières nationales, une **gouvernance transfrontière de l'eau**, qui adopte la « perspective du bassin » et tient compte des eaux de montagne, peut apporter bon nombre d'avantages aux pays riverains. En effet, la **coopération régionale** entre pays aux fins de la gouvernance transfrontière des espaces naturels et des bassins fluviaux est un mécanisme important pour faire progresser le développement durable dans les montagnes, d'autant plus que beaucoup de chaînes de montagnes et de services écosystémiques de montagne sont transfrontaliers. Grâce à la conclusion de traités ou d'accords, la coopération peut être renforcée par le partage de données et d'informations, permettant ainsi de combler les lacunes en matière de capacités techniques humaines et institutionnelles ainsi que de promouvoir et d'encourager le dialogue et la diplomatie.

Les recommandations contenues dans les politiques internationales et les accords transfrontières fournissent des orientations à l'élaboration des politiques et des stratégies nationales. Cependant, la gestion des eaux de montagne s'effectue principalement à l'échelle des pays, au moyen de **lois**, de **politiques** et de **stratégies nationales**. La formulation et la mise en œuvre des politiques s'inscrivent dans un contexte politique et économique national. Dans certains cas, les politiques nationales relatives à l'eau, à l'agriculture, à l'industrie et à l'énergie sont élaborées de manière à favoriser les régions de faible altitude au sein des bassins hydrographiques, afin notamment de bénéficier à des zones plus peuplées. Il est rare qu'elles tiennent pleinement compte des problématiques sectorielles propres aux montagnes relativement à l'eau ; au contraire, elles ont tendance à envisager les montagnes uniquement comme des sources d'approvisionnement pour les usagers en aval.

En dépit des fonds considérables qui pourraient servir d'**investissements** dans le développement durable des régions montagneuses, l'accès aux principaux programmes d'aide a été relativement réduit. Malgré son intérêt, cette solution non négligeable reste donc insuffisamment appliquée. Un meilleur emploi des **aides** et **financements** disponibles pourrait contribuer à alléger le fardeau des collectivités et des pays de montagne, pour lesquels il apparaît essentiel de renforcer la capacité et l'aptitude des acteurs à identifier puis à mobiliser des ressources financières.

Le développement des régions de haute altitude occasionne généralement plus de dépenses et de difficultés que celui des territoires de plus basse altitude en raison du relief accidenté et du manque d'accès, des limites imposées aux économies d'échelle, de l'éloignement des ports maritimes et des centres d'affaire ainsi que du faible développement des secteurs

de l'industrie et des services. Plus la zone est isolée et en altitude, plus les coûts liés au transport, à l'infrastructure, aux biens et aux services augmentent. C'est là un aspect dont il faut tenir compte dans les **politiques** et les **financements**, et qui justifie la mise en place de politiques et de programmes spécifiques aux montagnes dans le cadre des plans de développement nationaux et mondiaux.

Face aux changements profonds auxquels nous assistons, il est important de comprendre l'hydrologie des montagnes et le rôle de la cryosphère en vue de parvenir à un développement durable ainsi qu'à une planification et à des mesures préventives. Il n'en reste pas moins que de nombreuses régions montagneuses font l'objet d'une surveillance défaillante, même en ce qui concerne les indicateurs de base telles la température et les précipitations. En outre, la plupart des stations de surveillance sont situées dans les vallées montagneuses de basse altitude, ce qui ne permet guère de rendre compte du climat des montagnes de plus haute altitude.

Faute de **données** comme d'**activités de surveillance et de recherche sur le long terme** relativement à la cryosphère de montagne et, plus généralement, aux eaux de montagne, il est difficile de prendre des mesures efficaces. Ce sont donc là des domaines d'investissement prioritaires pour l'**acquisition de savoirs et le renforcement des capacités à long terme** qui s'avèrent indispensables. Dans un monde où les pénuries d'eau se multiplient, il est essentiel d'améliorer les connaissances sur les ressources en eau actuelles et futures au sein des régions montagneuses. Pour cela, il convient d'investir durablement dans des stations de surveillance, certes coûteuses, mais qui permettront de rendre compte de l'évolution des glaciers et du climat en haute altitude sur le long terme, ainsi que dans une science intégrative à travers toutes les disciplines, afin de mieux comprendre les eaux et les sociétés de montagne. De même, il serait louable d'assurer un accès libre et complet à toutes les données relatives aux ressources hydriques.

Coda

Les montagnes fournissent une eau vitale à des milliards de personnes et d'innombrables écosystèmes. Véritables châteaux d'eau de la planète, elles jouent un rôle critique pour le développement durable qui ne peut être ignoré.

Si l'on veut mieux comprendre et protéger ces environnements fragiles, de plus en plus menacés par le changement climatique et les activités humaines non durables, il nous faut agir.

Car rien de ce qui a lieu dans les montagnes ne reste dans les montagnes.

D'une façon ou d'une autre, **nous vivons tous en aval d'une montagne**.



Acronymes

APD	Aide publique au développement
BID	Banque interaméricaine de développement
CBFEWS	Systèmes d'alerte précoce au niveau communautaire
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDN	Contribution déterminée au niveau national
CHR	Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin
CLD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement
CREA	Centre de recherches sur les écosystèmes d'altitude
EEN	Équivalent en eau de la neige
EU	États-Unis d'Amérique
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
Gt	Pétagrammes ou gigatonnes
INARCH	International Network for Alpine Research Catchment Hydrology (Réseau international de recherches alpines sur l'hydrologie des bassins hydrographiques)
IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
LER	Amplitude d'altitudes locales
Mètres ASL	Mètres au-dessus du niveau de la mer
m w.e.	Mètres d'équivalent en eau
NDT	Neutralité en matière de dégradation des terres
ODD	Objectif de développement durable
PHI	Programme hydrologique intergouvernemental
PNA	Plan national d'adaptation
Réseau TPRCC	Réseau de centres climatiques régionaux du troisième pôle
RRC	Réduction des risques de catastrophe naturelle
SIPAM	Systèmes ingénieux du patrimoine agricole mondial
SPG	Systèmes participatifs de garantie
WASH	Eau, assainissement et hygiène (services)
WGMS	Service de surveillance mondiale des glaciers

RAPPORT MONDIAL DES NATIONS UNIES SUR LA MISE EN VALEUR DES RESSOURCES EN EAU



ISBN 978-92-3-200305-8

© UNESCO 2024

196 pages

Prix : 55,00 EUR

WWDR 2024 En couleur, avec encadrés, figures, cartes, tableaux, notes, photographies, bibliographie, liste des abréviations, ainsi que les avant-propos de la Directrice générale de l'UNESCO, Audrey Azoulay, et du Président d'ONU-Eau et Président du FIDA, Alvaro Lario



ISBN 978-92-3-200337-9

© UNESCO 2025

196 pages

Prix : 55,00 EUR

WWDR 2025 En couleur, avec encadrés, figures, cartes, tableaux, notes, photographies, bibliographie, liste des abréviations, ainsi que les avant-propos de la Directrice générale de l'UNESCO, Audrey Azoulay, et du Président d'ONU-Eau et Président du FIDA, Alvaro Lario

Pour télécharger, au format PDF, le rapport et les publications associées, les anciennes éditions du WWDR et d'autres supports d'information, consultez l'adresse suivante fr.unesco.org/wwap

PUBLICATIONS ASSOCIÉES



Résumé du WWDR 2024

12 pages

Disponible en allemand, anglais, arabe, chinois, coréen, espagnol, français, hindi, italien, portugais et russe



Faits, chiffres et exemples d'actions du WWDR 2024

24 pages

Disponible en anglais, espagnol, français, italien et portugais



Résumé du WWDR 2025

12 pages

Disponible en allemand, anglais, arabe, chinois, coréen, espagnol, français, hindi, italien, népalais, portugais et russe



Faits et chiffres du WWDR 2025

12 pages

Disponible en anglais, espagnol, français, italien, népalais et portugais

Pour télécharger ces documents, consultez l'adresse suivante fr.unesco.org/wwap.

RAPPORTS D'ONU-EAU ET AUTRES PUBLICATIONS PERTINENTES

ONU-Eau coordonne les efforts des entités de l'Organisation des Nations Unies et des organisations internationales qui travaillent sur les questions relatives à l'eau et à l'assainissement. Ce faisant, ONU-Eau cherche à accroître l'efficacité de l'appui fourni aux États Membres dans leurs efforts pour parvenir à des accords internationaux sur l'eau et l'assainissement. Les publications d'ONU-Eau s'appuient sur l'expérience et l'expertise des membres et partenaires d'ONU-Eau.

Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau

Abordant un thème différent chaque année, le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau* est le rapport phare d'ONU-Eau sur les problématiques liées à l'eau et à l'assainissement. Le rapport est publié par l'UNESCO au nom d'ONU-Eau et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau. Il expose les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau. Publié à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, le rapport met à disposition des décideurs des connaissances et des outils pour leur permettre de concevoir et de mettre en œuvre des politiques durables en matière d'eau. Il présente aussi certaines des meilleures pratiques ainsi que des analyses approfondies, qui stimuleront les idées et galvaniseront les actions aux fins d'une meilleure gestion dans le secteur de l'eau et au-delà.

Stratégie en matière d'eau et d'assainissement à l'échelle du système des Nations Unies

À la suite de la Conférence des Nations Unies sur l'eau 2023, l'Assemblée générale, dans sa résolution A/RES/77/334, « [prie] le Secrétaire général de présenter une stratégie en matière d'eau et d'assainissement à l'échelle du système des Nations Unies, en consultation avec les États Membres, avant la fin de sa soixante-dix-huitième session ». Cette stratégie a pour but d'améliorer la coordination et la mise en œuvre des priorités en matière d'eau au sein de l'ensemble du système des Nations Unies afin d'apporter un soutien plus stratégique, plus effectif, plus cohérent et plus efficace aux États Membres dans leurs efforts pour accélérer les progrès dans l'application des plans et priorités nationaux, vers les objectifs et cibles convenus au niveau international pour les ressources en eau et vers des solutions transformatrices pour répondre aux défis actuels et futurs liés à l'eau. La stratégie a été lancée en juillet 2024 lors du Forum politique de haut niveau pour le développement durable à New York.

Analyse et évaluation mondiales d'ONU-Eau sur l'assainissement et l'eau potable (GLAAS)

GLAAS est produite par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) pour le compte d'ONU-Eau. Il s'agit d'un compte-rendu mondial actualisé des cadres politiques, des accords institutionnels, des ressources humaines et des flux financiers, internationaux et nationaux, en faveur de l'eau et de l'assainissement. Il contribue de manière substantielle aux activités relatives à l'assainissement et l'eau pour tous (SWA) ainsi qu'à l'élaboration du bilan de mise en œuvre de l'ODD 6.

Les rapports d'activité du Programme commun OMS/UNICEF de suivi de l'approvisionnement en eau, de l'assainissement et de l'hygiène (JMP)

Le JMP est affilié à ONU-Eau et assure le suivi mondial des progrès réalisés en vue d'atteindre les cibles de l'ODD 6, à savoir l'accès universel à une eau potable, sûre et abordable ainsi qu'à un assainissement et une hygiène adéquats et équitables. Tous les deux ans, le JMP publie des estimations et des rapports d'activité actualisés sur les services WASH dans les foyers (dans le cadre du suivi de la mise en œuvre de l'ODD 6), les écoles et les établissements de soins de santé.

Études de cas sur l'accélération des pays publiées par ONU-Eau

Afin d'atteindre plus rapidement les cibles de l'ODD 6 conformément au Cadre mondial d'accélération de la réalisation de cet objectif, ONU-Eau publie des études de cas sur l'accélération des pays pour l'ODD 6, qui permettent d'examiner les méthodes adoptées par chaque pays pour progresser plus rapidement vers la réalisation de cet objectif. Ces études de cas décrivent les bonnes pratiques à suivre pour atteindre les cibles de l'ODD 6 et examinent comment les progrès peuvent être intensifiés pour toutes ces cibles dans un pays donné. Depuis 2022, neuf études de cas ont été publiées pour le Brésil, le Cambodge, le Costa Rica, le Ghana, la Jordanie, le Pakistan, le Sénégal, Singapour et la Tchéquie. Trois nouvelles études de cas sur l'Arabie saoudite, le Bhoutan et le Rwanda doivent être publiées en juillet 2025.

Notes d'orientation et notes analytiques

Les notes d'orientation d'ONU-Eau fournissent des conseils d'orientation des politiques, brefs et informatifs, sur les questions les plus pressantes liées à l'eau potable en s'appuyant sur les expertises combinées du système des Nations Unies. Les notes analytiques fournissent une analyse des problèmes émergents et peuvent servir de base à des recherches, des discussions et des décisions politiques futures.

PUBLICATIONS D'ONU-EAU À VENIR

- Note d'orientation d'ONU-Eau sur les eaux transfrontalières – mise à jour
- Note analytique d'ONU-Eau sur les innovations dans le secteur de l'eau
- Note d'orientation d'ONU-Eau sur le changement climatique, l'environnement et les droits humains

LA JOURNÉE MONDIALE DE L'EAU ET LE RAPPORT MONDIAL DES NATIONS UNIES SUR LA MISE EN VALEUR DES RESSOURCES EN EAU

L'Organisation des Nations Unies désigne certaines journées, semaines, années et décennies pour en faire des occasions de marquer des événements ou d'attirer l'attention sur des sujets particuliers dans le but de promouvoir, grâce à des activités de sensibilisation et des actions, ses objectifs.



Ces célébrations internationales sont l'occasion d'instruire le public sur des sujets de préoccupation, de galvaniser les volontés politiques, de mobiliser les ressources pour répondre aux problèmes mondiaux, ainsi que de célébrer et de renforcer les accomplissements de l'humanité.

La majorité de ces dates ont été établies par des résolutions de l'Assemblée générale des Nations Unies. La Journée mondiale de l'eau (22 mars) est issue de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement de 1992, lors de laquelle une célébration internationale de l'eau fut recommandée.

En réponse, l'Assemblée générale des Nations Unies a désigné le 22 mars 1993 comme la première Journée mondiale de l'eau. Elle est depuis célébrée chaque année, étant l'une des journées internationales les plus mobilisatrices avec la Journée internationale des femmes (8 mars), la Journée internationale de la paix (21 septembre) et la Journée des droits de l'homme (10 décembre).

Chaque année, ONU-Eau – le mécanisme de coordination des Nations Unies en matière d'eau et d'assainissement – choisit, pour la Journée mondiale de l'eau, un thème qui correspond à un défi, actuel ou futur, lié aux ressources en eau. Ce thème oriente également le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau*, rapport qui est présenté lors de la Journée mondiale de l'eau. Cette publication est le rapport phare d'ONU-Eau et met à disposition des décideurs, des connaissances et des outils pour leur permettre de concevoir et de mettre en œuvre des politiques durables en matière d'eau. Elle expose aussi les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement, sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau.

Le rapport est publié par l'UNESCO, au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau.

Les montagnes, dont on dit souvent qu'elles sont les châteaux d'eau de la planète, sont de plus en plus vulnérables au changement climatique et aux activités humaines non durables, ce qui met en péril les ressources en eau dont dépendent des milliards de personnes et d'innombrables écosystèmes.

Le *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2025 – Montagnes et Glaciers : des châteaux d'eau* attire l'attention sur les services essentiels et les bénéfices que procurent les eaux de montagne et les glaciers alpins aux sociétés, aux économies et à l'environnement. S'intéressant particulièrement aux solutions techniques et aux orientations politiques requises pour améliorer la gestion de l'eau dans les montagnes, le rapport aborde des problématiques fondamentales telles que l'approvisionnement en eau et l'assainissement, l'atténuation du changement climatique et l'adaptation à celui-ci, la sécurité alimentaire et énergétique, l'industrie, la réduction des risques de catastrophe naturelle et la protection des écosystèmes.

En droite ligne du choix de l'année 2025 comme Année internationale de la préservation des glaciers et de l'adoption d'une résolution sur le développement durable dans les régions montagneuses par l'Assemblée générale de l'Organisation des Nations Unies en 2022, ce rapport vise à rappeler au monde entier l'importance des eaux de montagne, en particulier des glaciers alpins, pour le développement durable des régions montagneuses ainsi que pour les sociétés en aval qui en dépendent, et ce alors que la cryosphère de montagne subit une évolution rapide.

Abordant un thème différent chaque année, le **Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau** est le rapport phare d'ONU-Eau sur les questions d'eau et d'assainissement. Le rapport est publié par l'UNESCO, au nom d'ONU-Eau, et sa production est coordonnée par le **Programme mondial de l'UNESCO pour l'évaluation des ressources en eau**. Il expose les principales évolutions de l'état, de l'utilisation et de la gestion de l'eau douce et de l'assainissement sur la base des travaux réalisés par les membres et les partenaires d'ONU-Eau. Publié à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, le rapport met à disposition des décideurs, des connaissances et des outils afin de leur permettre de concevoir et de mettre en œuvre des politiques durables. Il présente aussi certaines des meilleures pratiques ainsi que des analyses approfondies, qui stimuleront les idées et galvaniseront les actions aux fins d'une meilleure gestion dans le secteur de l'eau et au-delà.

Nous remercions le Gouvernement italien et la Région Ombrie pour leur soutien financier.



Region Umbria

